

Т.В. Кімстач, К.І. Узлов, С.І. Реп'ях, Л.І. Солоненко, І.О. Осіпенко

**ФУНКЦІОНАЛЬНІ ЗАЛЕЖНОСТІ МІЖ ПОКАЗНИКАМИ МЕХАНІЧНИХ
ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА ХІМІЧНИМ СКЛАДОМ
ОЛОВ'ЯНО-АЛЮМІНІЄВОЇ БРОНЗИ**

Анотація. Встановлено статистично значущі зв'язки між властивостями литої олов'яно-алюмінієвої бронзи при вмісті олова та алюмінію до 6% кожного, а також між властивостями бронзи та її хімічним складом, що дозволить прогнозувати рівень механічних властивостей при заливанні в суху піщано-рідкоскляну форму.

Ключові слова: бронзи; механічні властивості; легуючі елементи; функціональні залежності; комплексний показник.

Постановка проблеми. Металеві деталі різних машин, механізмів, агрегатів для успішного виконання службових функцій повинні мати певний рівень механічних властивостей. Цей комплекс показників, що є одним з основних характеристик будь якого сплаву, визначає працездатність деталей і, в основному, залежить від наступних факторів: природи металу – основи сплаву (типу кристалічних ґраток і величини сил міжатомної взаємодії), хімічного складу сплаву (ступеня легуваності), наявності, виду та кількості шкідливих домішок, наявності, виду та кількості неметалевих включень та розчинених газів – (О, Н, N), умов та швидкості тверднення виливків.

Характер зміни рівня механічних властивостей сплаву при зміні того, або іншого фактору може бути найрізноманітнішим. Тому, під час розробки технології виготовлення будь якої литої деталі, виникає необхідність відшукати статистично значущі зв'язки між властивостями сплаву, а також між властивостями сплаву та його хімічним складом, умовами кристалізації тощо, які дозволять розрахунковим шляхом прогнозувати значення його механічних властивостей спираючись на обмежену кількість експериментальних даних. Наявність таких функціональних залежностей дозволяє значно скоротити витрати часу та коштів на розробку або корегування хімічного складу будь-якого сплаву з метою підвищення експлуатаційних властивостей та довговічності відповідної кожної конкретної литої деталі.

Аналіз досліджень і публікацій. В даний час питанням пошуку функціональних залежностей між показниками механічних властивостей, хімічним складом сплавів, умовами тверднення сплаву тощо, присвячена значна кількість досліджень. Зокрема, авторами роботи [1] встановлено залежності між тимчасовим опором при розтягуванні (σ_B) ряду сплавів та їх твердістю (HB), опором зрізу та межею міцності.

В роботах [2-6] для непрямого визначення характеристик міцності авторами рекомендовано використовувати рівняння виду:

$$\sigma_B = A \cdot HB, \quad (1)$$

де A – коефіцієнт HB (твердість за Брінелем, од), про що, зокрема, свідчать дані табл. 1.

Таблиця 1

Залежність між числом твердості по Брінелю (HB) та тимчасовим опором при розтягуванні (σ_B) [2-6]

Матеріал	HB, МПа	Вид обробки	Залежність
Сталь	1250–1750	–	$\sigma_B = 0,343 HB$
	> 1750	–	$\sigma_B = 0,362 HB$
Маловуглецеві ковані та гарячекатані сталі	–	–	$\sigma_B = 0,36 HB$
Високоміцні сталі	–	–	$\sigma_B = 0,33 HB$
Серій чавун	–	–	$\sigma_B = (HB-40) / 6$
Алюмінієве лиття	–	–	$\sigma_B = 0,26 HB$
	200–450	–	$\sigma_B \approx (0,33 - 0,36) HB$
Алюмінієві деформовані сплави	–	–	$\sigma_B = 0,38 HB$
Мідь, латунь, бронза	–	відпал	$\sigma_B = 0,55 HB$
	–	наклеп	$\sigma_B = 0,40 HB$
Дуралюмін	–	відпал	$\sigma_B \approx 0,36 HB$
	–	загартування та старіння	$\sigma_B \approx 0,35 HB$
Титанові сплави	–	–	$\sigma_B \approx 0,30 HB$

З аналізу даних табл. 1 витікає, що для одного й того ж матеріалу σ_B значною мірою залежить від НВ, тобто від його структурної будови, яка обумовлена типом обробки.

За даними роботи [7] для розрахунку межі витривалості матеріалу (низьковуглецевих низьколегованих сталей) пропонується наступний ряд залежностей:

$$\sigma_{-1} = 0,47 \cdot \sigma_B \quad (2)$$

$$\sigma_{-1} = 0,35 \cdot \sigma_B + 122 \quad (3)$$

$$\sigma_{-1} = 0,25 \cdot (\sigma_B + \sigma_{0,2}) \quad (4)$$

де σ_{-1} – межі витривалості, МПа;

σ_B – тимчасовий опір при розтягуванні, МПа;

$\sigma_{0,2}$ – умовна межа плинності, МПа.

Зіставлення розрахункових та експериментальних даних авторами роботи [8] показало їх найбільшу збіжність у разі визначення σ_{-1} за рівняннями (2). При цьому розрахункові значення межі витривалості практично у всіх випадках вищі за експериментальні, а максимальна різниця між розрахованими та експериментальними величинами досягає 19...20%. Розрахунки межі витривалості вуглецевих і низьколегованих сталей за формулами (3, 4) дає різницю у таких значеннях близько 35% [8].

Для розрахунку відносного подовження (δ) конструкційних вуглецевих та легованих сталей у роботі [7] запропоновано наступне співвідношення:

$$\delta = \frac{420 \cdot 100\%}{2\sigma_B + \sigma_{0,2}} \quad (5)$$

Для визначення відносного звуження (ψ) вуглецевих сталей, залежно від їх попередньої термічної обробки, автори рекомендують використовувати наступні залежності:

– після загартування та відпуску:

$$\psi = 105 - 0,0186 \cdot HB \quad (6)$$

– після нормалізації:

$$\psi = 85,6 - 0,0134 \cdot HB \quad (7)$$

– після відпалу:

$$\psi = 105 - 0,0316 \cdot HB \quad (8)$$

В роботі [9] авторами було визначено, що для вуглецевих та легованих гарячекатаних і термічно оброблених сталей між значеннями екстрапольованої межі плинності (S_0) та σ_B , незалежно від марки матеріалу, та попереднього

режиму обробки, існує лінійна залежність. Математична обробка експериментальних даних показує, що S_0 в середньому приблизно на 6% менше σ_B , тобто:

$$S_0 \approx 0,94 \cdot \sigma_B \quad (9)$$

Для всіх досліджуваних в даній роботі [9] матеріалів (армко-залізо, вуглецеві та леговані сталі), що попередньо були гарячекатані або термічно оброблені (відпал, нормалізація або поліпшення), незалежно від виду попередньої обробки і всього діапазону ступенів деформації між напруженням плинності (S) і відповідною твердістю сформованих зразків (HB') існує лінійна залежність виду:

$$S = \frac{HB' - 66}{1,65} \quad (10)$$

Вплив вихідної твердості на величину екстрапольованої межі плинності при стиску вуглецевих та легованих термічно оброблених (відпал, нормалізація, поліпшення) та гарячекатаних сталей можливо описати наступною залежністю:

$$S_0 = 14 + 0,33 \cdot HB \quad (11)$$

Автори роботи [9] зазначають, що в реальних металевих тілах твердість у різних точках тіла може відрізнятися на декілька одиниць, а точність вимірювання при іспитах за Брінелем становить 3%, тому залежності (10) та (11) мають дещо приблизний характер.

У роботі [10] авторами запропонована методика, для прогнозування зміни фізичних властивостей бінарних алюмінієвих сплавів при заміні одного легуючого елемента на інший. В основу досліджень авторами було зроблено припущення о наявності взаємозв'язків між всіма показниками механічних властивостей металевих сплавів. Тобто, маючи кореляційні рівняння та вивчивши детально одну з механічних властивостей сплавів, можливо прогнозувати, як змінюватимуться інші властивості залежно від зміни концентрації одного з легуючих елементів або заміні цього елемента на інший. Перевірку такого припущення проводили [10] для бінарних сплавів на основі алюмінію в області твердих розчинів.

За результатами цих досліджень встановлено, що в області твердих розчинів твердість за Брінелем, тимчасовий опір при розтягуванні і відносне подовження змінюються лінійно зі зростанням концентрації легуючого елемента, що математично можливо описати наступним рівнянням:

$$Y = a + b \cdot x \quad (12)$$

де Y - величина досліджуваної властивості;

a і b - коефіцієнти;

x - концентрація легуючого елемента.

Коефіцієнт a показує величину досліджуваного параметра при нульовій концентрації легуючого елемента, а коефіцієнт b – швидкість зміни даного параметра за зміни концентрації легуючого елемента. Відповідно, при заміні одного легуючого елемента на інший змінюється величина b , а коефіцієнт a залишається незмінним [10].

На рівень механічних властивостей литого сплаву впливають і залишкові напруження в литому виробі, у зв'язку з чим у роботі [11] встановлено зв'язок між рівнем механічних властивостей ряду литих сплавів з величиною їх відносної лінійної усадки. При цьому, чим більше величина лінійної усадки, тим вище міцність сплавів при розтягуванні.

В роботі [12] наведено залежності механічних властивостей титанового сплаву ВТ5Л від його хімічного складу та товщини стінок виливків ($\delta = 3 \dots 16$ мм):

$$\sigma_B = \sigma_{B(\infty)} + \frac{57}{\delta}, \quad (13)$$

$$\sigma_{B(\infty)} = 250 + 60 \cdot C_{Al}^{1,3} + 87 \cdot C_{Fe}^{1,1} + 330 \cdot C_C^{1,5} + 200 \cdot C_O^{0,9} + 700 \cdot C_N^{1,2},$$

де δ - товщина стінки виливки, мм;

$\sigma_{B(\infty)}$ – тимчасовий опір при розтягуванні сплаву електроду, що витрачається при плавці, МПа;

C_{Al} , C_{Fe} , C_C , C_O , C_N – відповідно, масовий вміст Al, Fe, C, O, N у сплаві електроду, %

$$\sigma_{0,2} = 0,94 \cdot \sigma_{\dot{A}(\infty)} + \frac{9}{\sqrt{0,006 \cdot \delta^{1,75}}}; \quad (14)$$

$$\psi = 0,02627 \cdot \sigma_{B(\infty)} + \frac{67}{\delta^{1,75}}; \quad (15)$$

$$KSU = 2777 - 2,6752 \cdot \sigma_{B(\infty)}. \quad (16)$$

З аналізу залежностей (14-16) випливає, що рівні показників $\sigma_{B(\infty)}$, $\sigma_{0,2}$ та ψ литого сплаву ВТ5Л зростають із підвищенням у сплаві вмісту Al, Fe, C, O, N, а також із зменшенням товщини стінки виливка. При цьому Fe, O та N найбільш ефективно зміцнюють цей сплав.

На сьогодні відомості про зазначені вище зв'язки для ливарних бронз практично відсутні. Тому, робота, що спрямована на визначення функціональних залежностей між механічними властивостями ливарних бронз та дослідження впливу легуючих компонентів на їх механічні властивості як основи для можливої розробки методики прогнозування їх значень шляхом розрахунків, є актуальною.

Мета і завдання досліджень. Метою роботи є визначення функціональних залежностей між механічними властивостями олов'яно-алюмінієвої бронзи.

Завдання досліджень - дослідження впливу легуючих компонентів в сплавах системи Cu-Sn-Al при вмісті олова та алюмінію до 6% на їх механічні властивості як основи для можливої розробки методики прогнозування їх значень шляхом розрахунків.

Матеріали, методи та методики досліджень. У дослідженнях використовували мідь марки М1 та сплави системи Cu-Al-Sn з масовим вмістом Al до 7,53 % (мас.) та Sn до 6,73% (мас.). Виготовлення дослідних сплавів проводили шляхом сплавлення первинних шихтових матеріалів технічної чистоти в індукційній печі з використанням графітового тигля і деревного вугілля в якості покривного матеріалу. Температуру вимірювали хромель-алюмелевою термопарою у комплекті з потенціометом АТ4208.

Механічні властивості досліджуваних сплавів розраховували за результатами випробувань відповідних зразків при їх статичному розтягуванні і ударному вигині при кімнатній температурі. Зразки для випробувань виготовляли механічною обробкою брусків з тріфоподібної проби, яку одержували заливанням 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 з U-подібним концентратором розмірами 10x10x55 мм відповідали вимогам ISO 148-1:2016 [13], зразки на статичне розтягування з розмірами робочої частини $\varnothing 6 \times 30$ мм відповідали вимогам ДСТУ ISO 6892-1:2019 [14].

Випробування зразків на статичне розтягування проводили на універсальній випробувальній машині FP100/1, оснащеною системою автоматичного запису діаграми розтягування з визначенням параметрів тимчасового опору при розтягуванні (σ_B) і умовної границі плинності ($\sigma_{0,2}$) при зусиллі 40 кН та

швидкості переміщення траверси 1 мм/хв. Випробування проводили за температури 20 °С. Відносне подовження (δ_5) та звуження (ψ) розраховували за результатами вимірювання довжин та діаметрів робочої частини зразків до та після їх випробувань штангенциркулем з точністю 0,02 мм. Випробування на ударний вигин проводили при температурі 20 °С відповідно до вимог ISO 148-1:2016 [13], на маятниковому копрі марки PSW 30 з максимальною енергією удару 300 Дж.

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

Для встановлення взаємозв'язку між показниками механічних властивостей, а також між механічними властивостями та кількістю легуючих компонентів олов'яно-алюмінієвих бронз використовували наступний комплексний показник (K_x):

$$K_x = \frac{Al}{(0,01 + Al + Sn)^{0,25}} + \frac{Sn}{(0,01 + Al + Sn)^{0,0001}} \quad (17)$$

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

За результатами визначення механічних властивостей досліджуваних бронз з використанням комп'ютерної програми EXEL будували залежності між показниками механічних властивостей та механічними властивостями і показником їх хімічного складу K_x .

Результати досліджень. Результати експериментального визначення хімічного складу, механічних властивостей міді та бронз, що містять до 7,53% (мас.) Al та до 6,73% (мас.) Sn, а також розрахункових значень параметра K_x наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Хімічний склад, значення параметра K_x і механічні властивості міді технічної чистоти та бронз

п/п	Вміст елементів, % (за масою)					K_x	Механічні властивості				
	Al	Sn	Si	Fe	Cu		δ_5 , %	Ψ , %	$\sigma_{0,2}$ МПа	σ_B МПа	KCU, Дж/см ²
1	0,00	0,00	0,02	0,02	99,9	0,00	49	71	78	217	197
2	1,02	1,30	0,00	0,11	97,5	2,13	44	60	57	155	182
3	3,11	1,42	0,00	0,13	95,3	3,55	37	54	93	233	172
4	1,47	3,30	0,00	0,11	95,1	4,29	33,4	45	127	283	150
5	7,53	0,00	0,08	0,10	92,2	4,54	35	47	107	282	137

Продовження таблиці 2											
6	6,01	1,02	0,02	0,11	92,8	4,71	33	45	127	315	124
7	6,32	1,37	0,28	0,12	91,9	5,16	27,3	34,8	107	242	105
8	3,87	3,86	0,18	0,11	91,9	6,18	21	27	124	232	68
9	0,00	6,73	0,00	0,11	93,6	6,73	17,8	22	133	253	49
10	4,18	4,46	0,16	0,09	91,1	6,90	17	21,5	98	195	45
11	2,66	5,68	0,00	0,10	91,5	7,24	17,1	21	151	310	40
12	4,69	4,98	0,14	0,038	89,62	7,64	13,1	16,5	155	270	28
13	2,31	6,76	0,21	0,11	90,6	8,09	12,4	15	142	275	22

Результати обробки даних табл. 2 у програмі Excel на персональному комп'ютері представлені у вигляді відповідних залежностей на рис. 1.

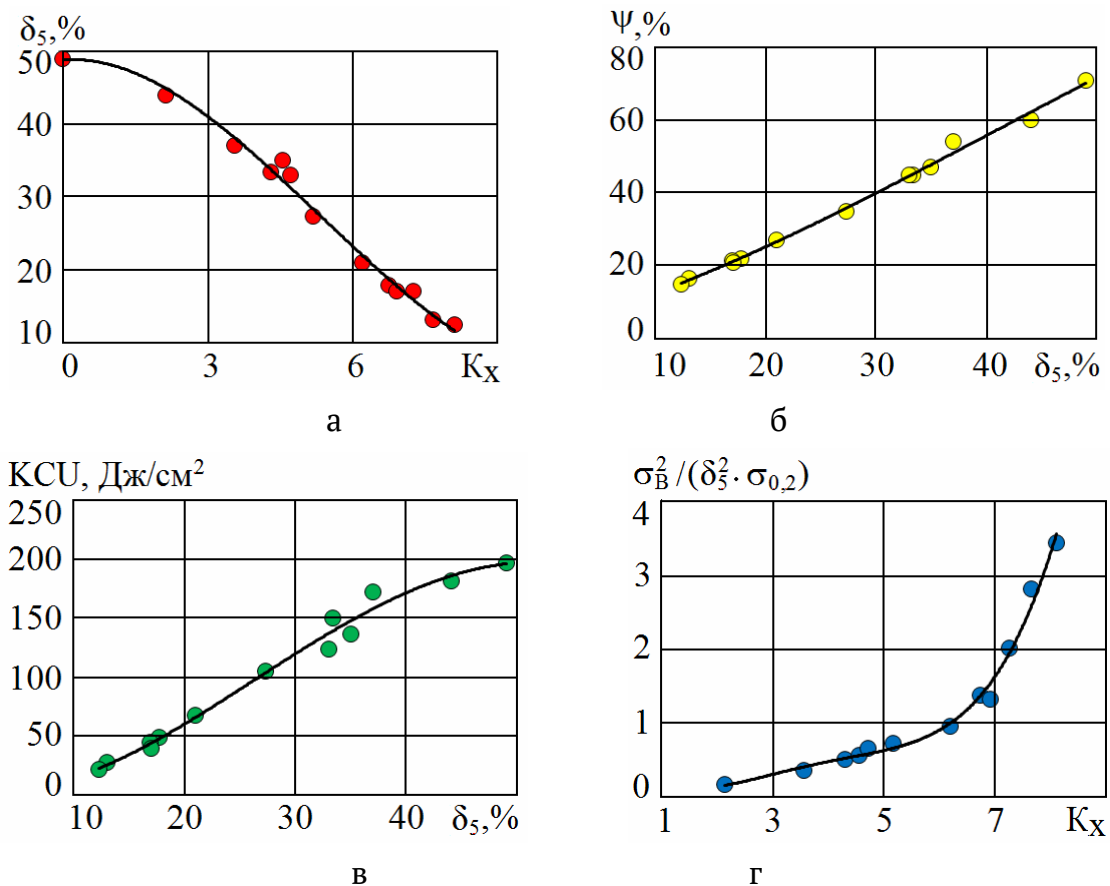


Рисунок 1 – Залежності між показниками механічних властивостей:

а – $\delta_5 = f(K_x)$; б – $\psi = f(\delta_5)$; в – $KCU = f(\delta_5)$;

$$\text{г} - \frac{\sigma_B^2}{\delta_5^2 \cdot \sigma_{0,2}^2} = f(K_x)$$

Рівняння регресії залежностей, представлених на рис. 1, а також величини достовірності апроксимації (R^2), розраховані за програмою Excel, наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Рівняння регресії залежностей на рис. 1

Залежність	Рівняння регресії	R^2
$\delta_{5*} = f(K_X)$	$y = 48,7179 + 0,56628 \cdot x - 1,2898 \cdot x^2 + 0,0808 \cdot x^3$	0,989
$\psi = f(\delta_{5*})$	$y = 2,6942 + 0,79518 \cdot x + 0,01976 \cdot x^2 - 0,00016 \cdot x^3$	0,996
$KCU = f(\delta_{5*})$	$y = 10,8396 - 2,58818 \cdot x + 0,35254 \cdot x^2 - 0,00532 \cdot x^3 + 0,00002 \cdot x^4$	0,986
$\frac{\sigma_B^2}{\delta_5^2 \cdot \sigma_{0,2}} = f(K_X)$	$y = 0,84889 - 1,11644 \cdot x + 0,57222 \cdot x^2 - 0,10845 \cdot x^3 + 0,00741 \cdot x^4$	0,988

Аналіз даних табл. 3 показує, що між показниками механічних властивостей та комплексним показником хімічного складу системи Cu-Al-Sn, яка досліджується, існує достатньо щільний зв'язок, про що свідчать високі значення величин достовірності апроксимації (R^2).

При цьому, величини δ_5 , ψ та KCU можливо визначити безпосередньо за рівняннями регресії (див. табл. 3) та за допомогою комплексного показника K_X , який розраховують за формулою (17).

Що до величин σ_B та $\sigma_{0,2}$, то їх при вмісті алюмінію та олова від 3 до 4% та кремнію і заліза до 0,2% рекомендується розраховувати за емпіричними формулами:

$$\sigma_B = 0,9367 \cdot Cu + 23,19 \cdot Al + 46,95 \cdot Sn - 51,59 \cdot Si + 53,87 \cdot Fe, \quad (18)$$

$$\sigma_{0,2} = -0,2603 \cdot Cu + 23,29 \cdot Al + 27,75 \cdot Sn + 6,975 \cdot Si - 65,56 \cdot Fe, \quad (19)$$

де Cu, Al, Sn, Si, Fe - масовий вміст хімічних елементів у бронзі, %.

Результати перевірки адекватності отриманих математичних моделей для δ_5 , ψ і KCU, що наведені в табл. 3 та за формулою (17), оцінювали за величиною абсолютної похибки між експериментальними та розрахунковими даними, що представлені в табл. 4 та табл. 5.

Таблиця 4

Похибка між розрахунковими та експериментальними
даними для δ_5 , ψ і КСУ

Вміст, % (мас.)		K _x	δ_5 , %		пох. (δ_5), %	ψ , %		пох. (ψ), %	КСУ, %		пох. (КСУ), %
Al	Sn		експ.	розр.		експ.	розр.		експ.	розр.	
0	0	0	49	48,7	0,7	71	67,7	4,7	197	195	0,9
1,02	1,3	2,13	44	45,0	-2,2	60	62,0	-3,3	182	189	-3,6
3,11	1,42	3,55	37	38,1	-3,0	54	51,6	4,4	172	163	5,1
1,47	3,3	4,29	33,4	33,7	-1,0	45	45,1	-0,3	150	141	6,1
7,53	0	4,54	35	32,2	8,0	47	42,9	8,8	137	132	3,5
6,01	1,02	4,71	33	31,1	5,7	45	41,3	8,2	124	126	-1,6
6,32	1,37	5,16	27,3	28,3	-3,5	34,8	37,2	-6,8	105	109	-3,8
3,87	3,86	6,18	21	21,8	-3,7	27	28,0	-3,7	68	70	-3,3
0	6,73	6,73	17,8	18,4	-3,5	22	23,4	-6,3	49	52	-5,2
4,18	4,46	6,9	17	17,4	-2,6	21,5	22,0	-2,5	45	46	-2,9
2,66	5,68	7,24	17,1	15,5	9,2	21	19,4	7,5	40	37	8,0
4,69	4,98	7,64	13,1	13,4	-2,6	16,5	16,6	-0,6	28	27	2,6
2,31	6,76	8,09	12,4	11,3	8,8	15	13,7	8,4	22	19	14,3

Таблиця 5

Похибка між розрахунковими та експериментальними даними для σ_B та $\sigma_{0,2}$

п/п	Вміст елементів, % (за масою)					σ_B , МПа		пох. (σ_B), %	$\sigma_{0,2}$, МПа		пох. ($\sigma_{0,2}$), %
	Al	Sn	Si	Fe	Cu	експ.	розр.		експ.	розр.	
1	3,01	3,92	0,04	0,12	99,9	282	289	-2,5	126	131	-3,9
2	3,14	3,77	0,10	0,20	97,5	352	342	2,7	148	141	4,6
3	3,31	4,00	0,20	0,20	95,3	359	351	2,1	153	152	0,4
4	3,47	3,32	0,02	0,11	95,1	325	328	-1,1	140	142	-1,2
5	3,53	3,50	0,18	0,07	92,2	314	324	-3,1	155	156	-0,9
6	3,25	3,02	0,10	0,15	92,8	337	331	1,9	144	140	2,8
7	3,98	4,00	0,02	0,03	91,9	352	360	-2,3	185	179	3,3

Висновки. За результатами виконаних досліджень вперше встановлено взаємозв'язки між механічними властивостями литої олов'яно -алюмінієвої бронзи, що на етапі проектування бронзи системи Cu-Sn-Al, у зазначених вище межах, зміни співвідношення кількості легуючих елементів дозволяє проводити прогнозування рівня її механічних властивостей при заливанні бронзи в суху піщано-рідкоскляну форму.

Відхилення між експериментальними та розрахунковими даними механічних властивостей пояснюються певним впливом домішок (Si, Fe) у сплавах, що потребує додаткових досліджень, а також усередненням величин механічних властивостей сплавів зумовлених точністю використаної апаратури, вимірювального інструменту та присутністю в досліджуваних зразках деяких ливарних дефектів структури.

В цілому, похибка між експериментальними та розрахунковими даними, як правило, менша 10% для δ_5 , ψ , KCU і менша 5% для σ_B і $\sigma_{0,2}$ є не значною, що дає підставу рекомендувати отримані залежності для проведення інженерних розрахунків з метою прогнозування механічних властивостей (δ_5 , ψ , KCU) сплавів системи Cu-Sn-Al при вмісті олова та алюмінію до 6%, а також для прогнозування механічних властивостей бронзи БрО3А3 при вмісті Al і Sn 3...4% та Si і Fe до 0,2% (кожного).

ЛІТЕРАТУРА

1. Физические величины: Справочник / А.П. Бабичев, Н.А.Бабушкина, А.М. Брагтовский и др.; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. Москва : Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
2. Методы исследования материалов / Л.И. Тушинский, А.В. Плохов, А.О. Токарев и др. Москва : Мир, 2004. 161 с.
3. Ефименко Л.А., Коновалова О.А., Камардинин В.П. и др. Оценка фактических параметров металла технических объектов нефтегазового комплекса. Химическое и нефтегазовое машиностроение. 1999. №4. С.35-36.
4. Определение твердости по Бринеллю. URL: https://edu.tltsu.ru/er/book_view.php?book_id=2ba&page_id=1053, (дата звернення: 12.05.2022).
5. Тылкин М.А. Справочник термиста ремонтной службы. Москва : Металлургия, 1981. 648 с.
6. Славский Ю.И., Артемьев Ю.Г. Твердость стали, как функция ее прочностного и структурного состояния. Заводская лаборатория. 1989. № 5. С. 88-91.

7. Шишкин А.В. Электротехническое металловедение: учебное пособие. Новосибирск : Из-во НГТУ, 1997. 45 с.
8. Ефименко Л. А., Прыгаев А.К. Определение фактических механических свойств металла трубопроводов на основе измерения твердости : учебное пособие. Москва : РГУ нефти и газа, 2007.
9. Зависимость между напряжением текучести и пределом прочности URL : <https://metrotest.ru/article/vzaimosvyaz-napryazheniya-tekuchesti-s-tverdostyu-i-predelom-prochnosti> (дата звернення: 12.05.2022).
10. Леонов В.В., Никифоров А.Г., Ковалева А.А. Выявление корреляционных взаимосвязей между физическими свойствами алюминиевых сплавов. FUNDAMENTAL RESEARCH. № 7, 2017. С. 44-48.
11. Репях С. И. Температура перехода из пластичного в упругое состояние литого материала при охлаждении в форме. Литьё Украины. 2015. № 9. С. 8–13.
12. Репях С.И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям. Днепрпетровск : Лира, 2006. 1056 с.
13. ISO 148-1:2016. Metallic materials. – Charpy pendulum impact test – Part 1: Test method. [Third edition 2016-10-15] 2016. 29 pp. (International standard).
14. 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.

REFERENCES

1. Fizicheskie velichiny: Spravochnik [Physical Quantities: Handbook] / A.P. Babichev, N.A. Babushkina, A.M. Bratkovskij i dr.; pod red. I.S. Grigor'eva, E.Z. Mejliхова. Moskva : Energoatomizdat, 1991. 1232 p. (in Russian).
2. Metody issledovaniya materialov [Materials research methods] / L.I. Tushinskij, A.V. Plovov, A.O. Tokarev i dr. Moskva : Mir, 2004. 161 p. (in Russian).
3. Efimenko L.A., Konovalova O.A., Kamardinin V.P. i dr. Ocenka fakticheskikh parametrov metalla tekhnicheskikh ob"ektov neftegazovogo kompleksa. [Estimation of the actual parameters of the metal of technical objects of the oil and gas complex] Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie [Chemical and oil and gas engineering]. 1999. №4. pp.35-36. (in Russian).
4. Opređenje tverdosti po Brinellyu [Determination of Brinell hardness]. URL : https://edu.tltsu.ru/er/book_view.php?book_id=2ba&page_id=1053, (available from: 15.05.2022). (in Russian).
5. Tylkin M.A. Spravochnik termista remontnoj sluzhby [Thermist's Handbook for Repair Service]. Moskva : Metallurgiya, 1981. 648 p. (in Russian).

6. Slavskij YU.I., Artem'ev YU.G. Tverdost' stali, kak funkciya ee prochnostnogo i strukturnogo sostoyaniya [The hardness of steel as a function of its strength and structural state]. Zavodskaya laboratoriya [Factory laboratory]. 1989. № 5. pp. 88-91. (in Russian).
7. Shishkin A.V. Elektrotekhnicheskoe metallovedenie: uchebnoe posobie [Electrotechnical metallurgy: a tutorial]. Novosibirsk : Iz-vo NGTU, 1997. 45 p. (in Russian).
8. Efimenko L. A., Prygaev A.K. Opredelenie fakticheskikh mekhanicheskikh svojstv metalla truboprovodov na osnove izmereniya tverdosti : uchebnoe posobie [Determination of the actual mechanical properties of pipeline metal based on hardness measurements: a tutorial]. Moskva : RGU nefi i gaza, 2007. (in Russian).
9. Zavisimost' mezhdu napryazheniem tekuchesti i predelom prochnosti [Relationship between yield stress and tensile strength]. URL : <https://metrotest.ru/article/vzaimosvyaz-napryazheniya-tekuchesti-s-tverdostyu-i-predelom-prochnosti> (available from: 14.05.2022). (in Russian).
10. Leonov V.V., Nikiforov A.G., Kovaleva A.A. Vyyavlenie korrelyacionnykh vzaimosvyazej mezhdu fizicheskimi svojstvami alyuminievykh splavov [Identification of correlation relationships between the physical properties of aluminum alloys]. FUNDAMENTAL RESEARCH. № 7, 2017. pp. 44-48.
11. Repyah S. I. Temperatura perekhoda iz plastichnogo v uprugoe sostoyanie litogo materiala pri ohlazhdenii v forme [The temperature of the transition from the plastic to the elastic state of the cast material during cooling in the mold]. Lit'yo Ukrainy [Casting of Ukraine]. 2015. № 9. pp. 8–13. (in Ukraine).
12. Repyah S.I. Tekhnologicheskie osnovy lit'ya po vyplavlyaemym modelyam [Technological foundations of investment casting]. Dnepropetrovsk : Lira, 2006. 1056 p. (in Ukraine)
13. ISO 148-1:2016. Metallic materials. – Charpy pendulum impact test – Part 1: Test method. [Third edition 2016-10-15] 2016. 29 pp. (International standard).
14. DSTU ISO 6892-1:2019 Metalevi materiali. Viprobuvannya na roztyag. Chastina 1. Metod viprobuvannya za kimnatnoï 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. (in Ukraine).

Received 12.04.2022.

Accepted 15.04.2022.

***Functional dependences between indicators of mechanical properties
and tin-aluminum bronze chemical composition***

Abstract. Problem statement. Statistically significant relationships establishing between cast tin-aluminum bronze properties, as well as between bronze properties and its chemical composition will predict the level of its mechanical properties when poured into dry sand-sodium-silicate mold. Purpose. Functional relationships determination between mechanical properties of tin-aluminum bronze with tin and aluminum content of up to 6% each. 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. Alloys chemical composition control has been carried out using precision analyzer EXPERT 4L on samples cut from club-shaped samples. Relationships between mechanical properties indicators, as well as mechanical properties and alloys chemical composition have been built using EXEL computer program. Results and discussion. According to Cu-Sn-Al alloys examination results, functional dependences between mechanical properties and Sn and Al content from 1 to 6% by weight of each have been established. This makes it possible to predict mechanical properties level according to chemical composition of such bronze during casting. Conclusions. For the first time, relationships between cast tin-aluminum bronze mechanical properties have been established. This is at the stage of Cu-Sn-Al system bronze designing, with tin and aluminum up to 6% each content, allows predicting its mechanical properties level when pouring bronze in dry sand-sodium-silicate mold.

Key words: bronze; mechanical properties; alloying elements; functional dependencies; complex indicator.

Кімстач Тетяна Володимирівна – старший викладач кафедри матеріалознавства та термічної обробки металів Інституту промислових та бізнес технологій Українського державного університету науки і технологій, Україна.

Узлов Костянтин Іванович – д.т.н., професор кафедри матеріалознавства та термічної обробки металів Інституту промислових та бізнес технологій Українського державного університету науки і технологій, Україна.

Реп'ях Сергій Іванович – д.т.н., професор кафедри ливарного виробництва Інституту промислових та бізнес технологій Українського державного університету науки і технологій, Україна.

Солоненко Людмила Ігорівна – к.т.н., доцент кафедри ливарного виробництва Інституту промислових та бізнес технологій Українського державного університету науки і технологій, Україна.

Осіпенко Ірина Олександрівна – к.т.н., доцент кафедри ливарного виробництва Інституту промислових та бізнес технологій Українського державного університету науки і технологій, Україна.

Kimstach Tetiana Volodymyrivna – Senior Instructor of the Department of Material Science and Heat Treatment of Metals, Ukrainian State University of Science and Technology, Institute of Industrial and Business Technologies. Ukraine.

Uzlov Konstantin Ivanovich – Doctor of Technical Science, Professor of the Department of Material Science and Heat Treatment of Metals, Ukrainian State University of Science and Technology, Institute of Industrial and Business Technologies. Ukraine.

Repyakh Sergei Ivanovich – Doctor of Technical Science, Professor of the Department of Foundry, Ukrainian State University of Science and Technology, Institute of Industrial and Business Technologies. Ukraine.

Solonenko Lyudmila Igorivna – Candidate of Technical Sciences, Assoc. Prof. of the Department of Foundry, Ukrainian State University of Science and Technology, Institute of Industrial and Business Technologies. Ukraine.

Osipenko Iryna Oleksandrivna – Candidate of Technical Sciences, Assoc. Prof. of the Department of Foundry, Ukrainian State University of Science and Technology, Institute of Industrial and Business Technologies. Ukraine.