

УДК 691.735:621.893

К. І. Узлов¹, д.т.н., проф., ORCID 0000-0003-0744-9890**С. І. Реп'ях**¹, д.т.н., проф., ORCID 0000-0003-0203-4135**Т. В. Кімстач**^{1,2}, к.т.н., доц., ORCID 0000-0002-8993-201X**О. А. Сафронова**², м.н.с., аспірант, ORCID 0000-0002-4032-4275**В. Ф. Мазорчук**¹, к.т.н., доц, ORCID 0000-0002-8512-0727**А. П. Білий**¹, аспірант, ORCID 0000-0003-2905-7046¹ *Український державний університет науки і технологій*² *Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*

ТРИБОТЕХНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВУ БрОЗА3 В УМОВАХ СУХОГО ТЕРТЯ

Анотація. В наявний час для виробництва підшипників найбільш часто використовують свинцеві та олов'яні бронзи, що зумовлено їх високим рівнем триботехнічних властивостей та надійністю в експлуатації. Разом з тим, заборона у Європейському союзі використання свинцю у будь яких виробках призвела до необхідності пошуку екологічно безпечних бронз з аналогічним або підвищеним рівнем триботехнічних властивостей. Перспективним напрямком вирішення даної проблеми є бронза БрОЗА3, мікроструктура якої повністю відповідає вимогам до підшипникових сплавів. Проте на сьогодні триботехнічні властивості бронзи БрОЗА3 не досліджені. Тому, завдання з дослідження триботехнічних властивостей литої бронзи БрОЗА3 у якості підшипникового сплаву є актуальним. Мета роботи – встановити величини відносної зносостійкості та коефіцієнту тертя, як параметрів за якими можливо рекомендувати використовувати литу бронзу марки БрОЗА3 як антифрикційний матеріал. Випробування на зносостійкість за схемою «диск-диск» проводили відповідно до вимог Державних та Міжнародних стандартів на машині мод. СМЦ-2 при навантаженні 45 кг (441 Н) в умовах тертя-кочення з проковзуванням 10% при кімнатних температурах. Триботехнічні випробування зразків досліджуваних бронз за схемою «куля-диск» проводили в умовах сухого тертя-ковзання на машині тертя «Micro-tribo» відповідно до Міжнародних стандартів DIN 50324 та ISO 20808. Мікроструктуру вивчали за допомогою оптичного мікроскопа NEOPHOT 21 зі збільшенням до 1000 крат. За результатами дослідження встановлено, що порівняно з бронзами БрО5Ц5С5 та БрА9Ж3Л бронза БрОЗА3 характеризується більш високим рівнем опору зношуванню при терті по-сухому, що зумовлено наявністю у її структурі твердої, але пластичної фази β -Cu₅Sn. Величина коефіцієнту тертя бронзи БрОЗА3 співпадає з аналогічним коефіцієнтом бронзи БрО5Ц5С5 і нижче ніж у чистої міді та бронз марок БрО8, БрА5 і БрА9Ж3Л. При цьому, з підвищенням вмісту як олова (від 3 до 4% за масою), так і алюмінію (від 3 до 4% за масою) коефіцієнт тертя бронзи БрОЗА3 знижується з 0,28 до 0,25. Результати досліджень є підставою рекомендувати бронзу БрОЗА3 у якості триботехнічного матеріалу в вузлах тертя на заміну не тільки свинцевих бронз та бронзи БрО5Ц5С5, але і бронзи марки БрА9Ж3Л.

Ключові слова: бронза, зносостійкість, тертя, маса, фаза, алюміній, олово, свинець.

Посилання для цитування: Триботехнічні властивості сплаву БрО3А3 в умовах сухого тертя / К. І. Узлов, С. І. Реп'ях, Т. В. Кімстач, О. А. Сафронова, В. Ф. Мазорчук, А. П. Білий // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. Вип. 37. С. 505-521. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-505-521>

Стан питання. Велика різноманітність умов роботи пар тертя і видів їх зношування зумовили необхідність розробки антифрикційних металевих матеріалів з різним рівнем тих чи інших властивостей, застосування різних мастильних матеріалів, способів зміцнення поверхонь, що труться, і т.п., що витікає з аналізу даних табл. 1 [1].

Таблиця 1 – Характеристика антифрикційних сплавів [1].

Марка матеріалу	НВ	Коефіцієнт тертя матеріалу по сталі		Припустимі режими роботи матеріалу (не більше)		
		без мастильного матеріалу	зі змащувальним матеріалом	p, МПа	w, м/с	p·w, МПа·м/с
Бабіти						
Б83	30	0,07-0,12	0,004-0,006	15	50	75
Б16	30			10	30	3
БК2	32			15	15	6
Бронзи						
БрО10Ф1	100	0,1-0,2	0,004-0,009	15	10	15
БрО5Ц5С5	60			8	3	12
БрС30	25			25	12	30
Латуні						
ЛЦ16К4	100	0,15-0,24	0,009-0,016	12	2	10
ЛЦ38Мц2С2	60			10,6	1	10
Алюмінієвий сплав						
АО9-2	31	0,10-0,15	0,008	25	20	100
Антифрикційні сірі чавуни						
АЧС-1	220	0,12-0,23	0,008	2,5	5	10
АЧС-3	160		0,016	6	0,75	5

Примітки p – тиск; w - швидкість руху вала; p·w - питома потужність тертя.

На сьогоднішній день усі металеві антифрикційні матеріали (сплави) ділять на два типи [1-3].

- 1) сплави з м'якою матрицею та твердими включеннями;
- 2) сплави з твердою матрицею та м'якими включеннями.

При цьому, за інших рівних умов, перевагу, як правило, віддають

антифрикційним сплавам з високою теплопровідністю, корозійною стійкістю та міцністю [4, 5].

До сплавів першого типу відносять бабіти, бронзи та латуні. М'яка матриця цих сплавів під час тертя забезпечує їм хорошу прироблюваність і мікрорельєф поверхні, що сприяє збільшенню надходження рідкого мастила до ділянок тертя і тепловідведення від них. При цьому тверді вclusions в м'якій матриці сприймають зовнішнє навантаження, зберігаючи її несучу здатність при терті.

Класичною мікроструктурою підшипникового матеріалу характеризується бронза БрСН60-2,5. У цій бронзі м'яка фаза представлена свинцем, а тверда – міддю. Нікель у бронзу доданий з метою ініціювання виникнення тонкорозгалужених дендритів з первинних кристалів міді, що при кристалізації сплаву ускладнює ліквідацію в ньому як міді, так і свинцю.

Порівняно з бабітами олов'яні та олов'яно-цинково-свинцеві бронзи [6] характеризуються нижчим рівнем антифрикційних властивостей і призначені для експлуатації за меншої інтенсивності зовнішнього впливу. Крім цього, у таких бронз низька корозійна стійкість у маслах і відносно висока вартість. У ряді випадків бронзи у вузлах тертя замінюють латунями, які в порівнянні з бронзами, маючи нижчі рівні антифрикційних властивостей, працюють виключно в умовах ще меншої питомої потужності тертя.

До сплавів другого типу відносять свинцеву бронзу БрС30, алюмінієвий сплав з 9%Sn і 2%Cu (за масою) і антифрикційні сірі чавуни.

У структурі антифрикційних чавунів включення м'якого чистого графіту під час тертя утворюють антизадиру плівку [7]. Такі чавуни відносно дешеві, але мають істотні недоліки у числі яких: погана прироблюваність, завелика чутливість до дефіциту мастильного матеріалу між поверхнями тертя, низька стійкість до впливу ударного навантаження, недоцільність їх використання в умовах великих навантажень.

На відміну від чавунів, антифрикційні сплави системи Al-Sn працюють при найбільшій питомій потужності тертя, що, на думку ряду дослідників, обумовлено здатністю олова виконувати функції твердого мастила без рідкого. Тим не менш, використання антифрикційних сплавів системи Al-Sn, а також Al-Pb або Al-Zn також обмежено, що пов'язано з їх низькою ливарною технологічністю.

В області виробництва підшипників тертя найбільшого поширення знайшли свинцеві бронзи, як матеріал з найвищим з відомих бронз рівнем антифрикційних властивостей та необхідним рівнем механічних властивостей, що витікає з аналізу даних табл. 2 [1-3, 6].

Таблиця 2 – Властивості найбільш поширених марок триботехнічних бронз [1-3, 6].

Марка бронзи	Властивості					
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	КСУ, кДж/м ²	НВ, МПа	Коефіцієнт тертя без змащення
Ливарні свинцеві бронзи (залівка в піщану форму)						
БрС30	60-80	30-60	4-6	76,5	245	0,165
БрС60Н2,5	30	–	5	–	140	–
Ливарні свинцево-олов'яні бронзи (залівка в піщану форму)						
БрО5С25	115-135	80-100	4-6	78	440-540	0,14
БрО8С12	145-175	100	3-8	98-137	685-690	0,10
Ливарні олов'яні бронзи (залівка в піщану форму)						
БрО6Ц6С3	145-195	–	8-12	225	590	0,16
БрО5Ц5С5	147	–	6	–	588	0,26
Ливарні алюмінієві бронзи (залівка в піщану форму)						
БрА9Ж3Л	392	–	10	196	980	0,18

Такий рівень триботехнічних властивостей зумовлений наявністю в структурі цих бронз мікрровключень пластичного свинцю у чистому вигляді.

Свинцева бронза БрС30 має високу теплопровідність та опір втоми, витримує дуже високі питомі навантаження [6], може працювати при температурах до 320 °С. За рівнем пластичності, прироблюваності та антифрикційним властивостям бронза БрС30 поступається бабіту Б83 [8, 9], характеризується низькою корозійною стійкістю в органічних кислотах.

Свинцеві та олов'яні бронзи, завдяки високим триботехнічним властивостям та надійності і на сьогодні залишаються основним матеріалом для виготовлення елементів тертя більшості промислових машин, агрегатів та механізмів затребуваність яких неухильно зростає, зокрема, у гірничо-видобувній промисловості, машино- та верстатобудуванні. Тим не менш, на сьогодні у Європейському союзі свинець признано екологічно неприпустимим матеріалом у будь якому виробі. Тому пошук або розробка антифрикційного матеріалу-замінника свинцевої бронзи є актуальним завданням вже сьогодні.

З числа конструкційних бронз у якості антифрикційного матеріалу, що працює при великих навантаженнях, часто застосовують і алюмінієву бронзу БрА9Ж3Л, яка має не найкращі антифрикційні показники, корозійну стійкість, ливарну технологічність, але є достатньо міцною та надійною (див. табл. 2).

Таким чином, у антифрикційного сплаву найкращою мікроструктурою є та, у якій в пластичній (м'якій) основі вкраплені

тверді, але все ж таки відносно пластичні, кристали другої фази, а сама структура міцна, дрібнозерниста і однорідна. Такі кристали забезпечують сплаву малий коефіцієнт тертя і, відповідно, малий зношування, а пластична основа при цьому забезпечує хороше опрацювання та пом'якшення ударного навантаження.

З цієї точки зору, на сьогодні найбільш перспективна нова бронза БрОЗА3, яка має високу корозійну стійкість, твердість і необхідний рівень механічних властивостей, що витікає з даних табл. 3, а також високі ливарні властивості та технологічні щодо механічної обробки лезовим інструментом.

Таблиця 3 – Хімічний склад і механічні властивості бронзи БрОЗА3 [10].

Вміст елементів, мас. %			Механічні властивості				
Sn	Al	Cu	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	KCU, Дж/см ²	НВ, МПа
3-4	3-4	Решта	220-300	115-130	20-30	57-62	680-750

Тим не менш, на сьогодні будь-які дані щодо триботехнічних показників бронзи БрОЗА3, зокрема показників зношування та коефіцієнта тертя в умовах тертя по-сухому пари бронза-сталь, відсутні, як і відсутній опис механізму зношування цієї бронзи під дією тертя, що є основою для проведення відповідних досліджень.

Мета дослідження – встановлення величин відносної зносостійкості та коефіцієнту тертя як параметрів за якими можливо рекомендувати використовувати литу бронзу марки БрОЗА3 як антифрикційний матеріал.

Методика дослідження. Зносостійкість визначали на зразках, які були виготовлені з бронз марок БрО5Ц5С5, БрА9Ж3Л та БрОЗА3, коефіцієнта тертя – на зразках з міді М2 та бронз БрОЗА3, БрА7, БрО8, БрА9Ж3Л, БрО5Ц5С5 $\varnothing 40 \times 10$ мм. Зразки виготовляли з виливків $\varnothing 50 \times 170$ мм, що були відлиті у ливарні форми з піщано-рідкоскляної суміші за схемою на рис. 1.

Плавку бронз проводили в графітовому тиглі індукційної печі металоемністю 3 кг (по міді) під шаром деревного вугілля. У якості шихти використовували мідь марки М1, олово марки О2, свинець марки С3, сталь марки Ст3, цинк марки Ц1, алюміній марки А7. Розплави бронз перед випуском з печі перегрівали на 100...120 °С вище їх температури ліквідус. Розкислення розплавів бронз марок БрО5Ц5С5 та БрА9Ж3Л проводили фосфористою міддю, розплав бронзи БрОЗА3 не розкислювали.

Після охолодження до кімнатної температури з виливків виготовляли зразки на зносостійкість та коефіцієнт тертя, забезпечуючи

при цьому шорсткість їх робочих поверхнь (див. рис. 1,б) на рівні 2,5...3,2 мкм.

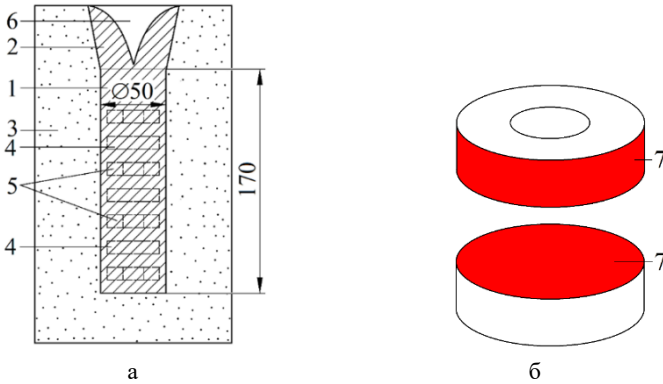


Рисунок 1 – Схема вилівка у ливарній формі та вирізки зразків: 1 – вилівок; 2 – надставка; 3 – ливарна форма; 4 – зразки для визначення коефіцієнту тертя; 5 – зразки для визначення зношування; 6 – усадкова раковина; 7 – робочі поверхні зразків (зафарбовано червоним кольором).

Випробування на зносостійкість за схемою «диск-диск» проводили відповідно до ASTM G65-16(2021) «Standard Test Method for Measuring Abrasion» та ASTM G99-17 «Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus» на машині моделі СМЦ-2 при навантаженні 45 кг (441 Н) в умовах тертя-кочення з проковзуванням при кімнатній температурі за схемою на рис. 2, а.

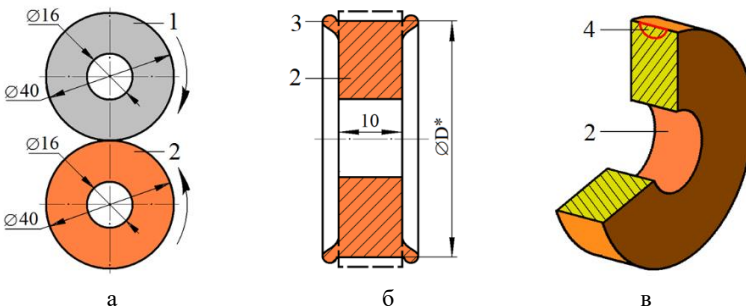


Рисунок 2 – Схема проведення випробувань на зносостійкість (а), схема виміру діаметра зразка після завершення його випробувань (б), схема розташування ділянки шліфа для мікроструктурних досліджень (в): 1 – контртіло; 2 – зразок; 3 – гребінці раскатки зразка; 4 – ділянка дослідження мікроструктури поверхневого шару зразка.

Контакт контртіла та зразка (див. рис. 2,а) здійснювали по їх зовнішній поверхні. Випробування проводили у два етапи. Перший етап – припрацювання поверхонь катання зразків впродовж 10000 циклів обертання під навантаженням. Другий етап – основне випробування, для чого контактуючу поверхню зразків очищали етиловим спиртом та зважували зразок з точністю до 0,0001 г з метою визначення його початкової маси m_0 . Після встановлення зразків при холостому ході (без навантаження) проводили регулювання діапазону вимірювання моменту тертя за шкалою електронного потенціометра, виставляли момент тертя та проводили навантаження зразка.

Випробування проводили при коефіцієнті прослизання 10 %, база випробувань за умовами сухого тертя складала $1,05 \cdot 10^5$ циклів, частота обертання нижнього шпинделя становила 300 хв^{-1} . У якості контр тіла використовували сталевий диск з твердістю 405 НВ та шорсткістю поверхні 2,5 мкм.

Критерієм оцінки опору зношуванню бронзи під час випробувань була прийнята відносна втрата маси зразка та відносне зменшення його зовнішнього діаметру D^* (див. рис. 2,б).

Відносний зношування за масою зразка розраховували за формулою:

$$\Delta m = 100 \cdot (1 - m_k / m_0), \quad (1)$$

де Δm – відносна втрата маси (знос) зразка при випробуваннях, %; m_0 – початкова маса зразка, г; m_k – кінцева маса зразка, г.

Відносний зношування за діаметром розраховували за формулою:

$$\Delta D = 100 \cdot (1 - D^* / 40), \quad (2)$$

Мікроструктуру зразків досліджували на ділянки, позначеною на рис. 2, в. Шліфи для досліджень готували стандартними методами відповідно до вимог ASTM E3 - 11(2017) «Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens» з використанням послідовної механічної [11] та електролітичної поліровок [12]. Хімічне травлення здійснювали у розчині $3,5 \text{ г FeCl}_3 + 25 \text{ мл HCl} + 75 \text{ мл C}_2\text{H}_5\text{OH}$ за режимами, які надані у роботах [12-14] Структуру досліджували на оптичному мікроскопі НЕОРНОТ 21 зі збільшенням $\times 100$; $\times 200$ та $\times 1000$.

Коефіцієнти тертя бронз визначали за схемою «куля-диск» в умовах сухого тертя-ковзання на машині тертя «Micron-tribo» у відповідності до стандартів DIN 50324 «Tribology; testing of friction and wear model test for sliding friction of solids (ball-on-disc system)» та ISO 20808 «Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) – Determination of friction and wear characteristics of monolithic ceramics by ball-on-disc method».

Схема випробувань на машині «Micron-tribo» представлена на рис. 3.

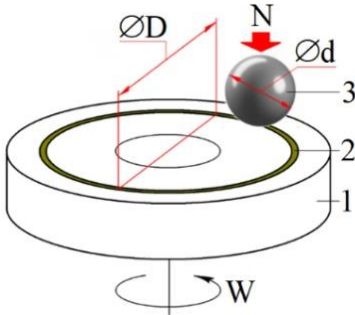


Рисунок 3 – Схема випробувань на машині тертя «Micron-tribo»: N – навантаження на кулю діаметром d, D – діаметр доріжки тертя отриманої при обертанні зразка зі швидкістю W: 1 – зразок; 2 - доріжка тертя; 3 – сталеву кулю.

Дослідження проводили на бронзових зразках $\varnothing 40 \times 10$ мм, вирізаних з виливків, що були залиті у ливарні форми з піщано-рідкоскляної суміші.

Випробування зразків на трибометрі проводилися з наступними параметрами: навантаження (N) – 200 гр (1,961 Н), кількість обертів диску (W) – 100, кількість обертів для проміжної зупинки (w) – 20, діаметр доріжки (D) – 7 мм. Контртілом у випробуваннях була кулька діаметром (d) 3 мм зі сталі ШХ15. Коефіцієнт тертя (k) розраховували за формулою:

$$k = \frac{F}{N}, \quad (3)$$

де F – сила тертя, Н; N - навантаження на кульку, Н.

Вплив хімічного складу бронзи на коефіцієнт тертя (k) оцінювали за експериментальними даними припускаючи, що такі залежності мають лінійний характер і, отже, можуть бути описані рівнянням лінійного типу наступного виду:

$$y_i = A_1 \cdot x_1 + A_2 \cdot x_2 + A_3 \cdot x_3 + A_4 \cdot (x_2 \cdot x_3)^\alpha, \quad (4)$$

де $A_1 \dots A_7$ - коефіцієнти регресії; $x_1 \dots x_3$ – масова частка компонента у бронзі (%); α – амбівалентна складова рівняння, яка відображає сумісну взаємодію компонента x_2 та компонента x_3 у бронзі на коефіцієнт k (величину α визначали емпірично за результатами аналізу експериментальних даних з точки зору адекватності моделі (4).

Результати випробувань обробляли шляхом розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь за методом Крамера [15].

Результати. За результатами досліджень на зношування встановлено, що зразки з числа досліджуваних бронз (БрО5Ц5С5 та БрА9Ж3Л) зразки бронзи БрО3А3 мали найменшу відносну втрату маси та вихідного діаметра про що свідчать залежності на рис. 4 та рис. 5.

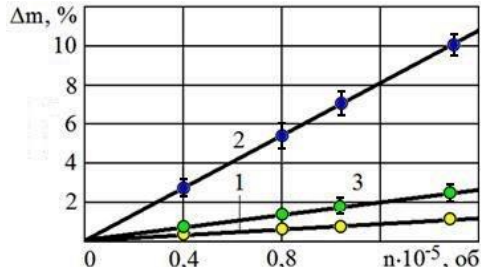


Рисунок 4 – Залежність зниження відносної маси зразків бронзи БрО3А3 (1), БрО5Ц5С5 (2), БрА9Ж3Л (3) від числа циклів їх контактного обертання.

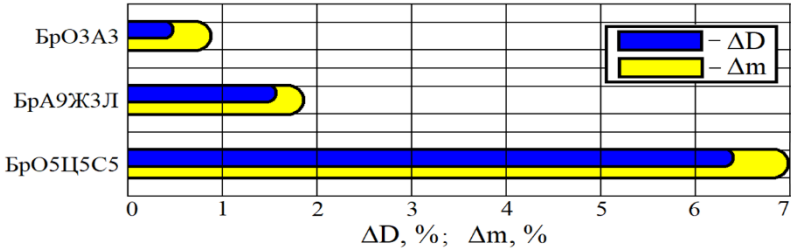


Рисунок 5 – Гістограма відносного зменшення вихідного діаметру (ΔD) та маси (Δm) бронзових зразків за час сухого тертя (після $1,05 \cdot 10^5$ обертів).

Таким чином, відповідно до рис. 5, бронза БрО3А3 має більш високий рівень опору зношуванню при сухому терті (відносна втрата маси - 0,8 %, діаметру - 0,5 % від їх вихідних величин) порівняно з бронзами БрО5Ц5С5 (відповідно, 7,0 % і 6,3 %) та БрА9Ж3Л (відповідно 1,7 % і 1,5 %). При цьому, залежності зниження відносної маси зразків з будь якої досліджуваної бронзи від кількості обертів мають лінійний характер.

Вигляд робочої поверхні зразків з бронзи БрО5Ц5С5 та БрА9Ж3Л по завершенню випробувань практично ідентичний. В той же час, вигляд робочої поверхні зразків з бронзи БрО3А3 відрізняється від вигляду робочих поверхонь зразків з інших досліджуваних бронз, що свідчать зображення на рис. 6.

Тобто, якщо на робочій поверхні зразків з бронз БрО5Ц5С5 та БрА9Ж3Л присутні локальні вириви (див. рис. 6,б), а колір поверхні залишився таким як і до початку випробувань, то у зразків з бронзи БрО3А3 робочі поверхні вкриті темно-коричневими плямами витягнутої форми, які розділені між собою мережею борозенок (див рис. 6,г).

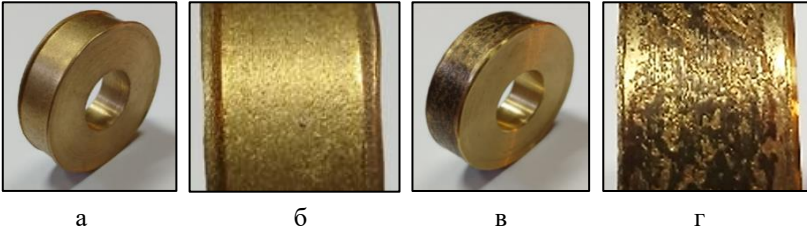


Рисунок 6 - Вигляд зразків (а, в) та поверхні їх тертя з контргтілом (б, г) після випробувань з бронзи BrO5Ц5С5 (а, б) та BrO3A3 (в, г).

Типові структурні стани, що притаманні зразкам після випробувань на зносостійкість представлені на рис. 7, а мікроструктура поверхневого шару зразка з бронзи BrO3A3 після закінчення його випробувань на сухе тертя представлена на рис. 8.

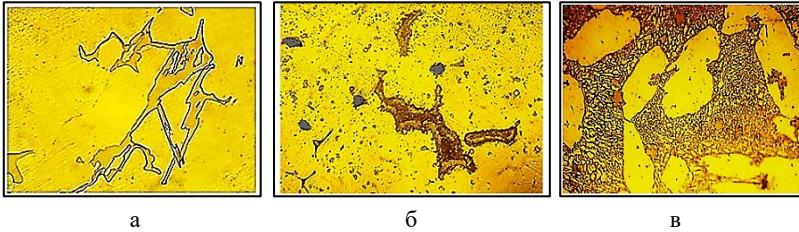


Рисунок 7 – Мікроструктури зразків бронзи BrO3A3 (а), BrO5Ц5С5 (б), BrA9ЖЗЛ (в), $\times 1000$.

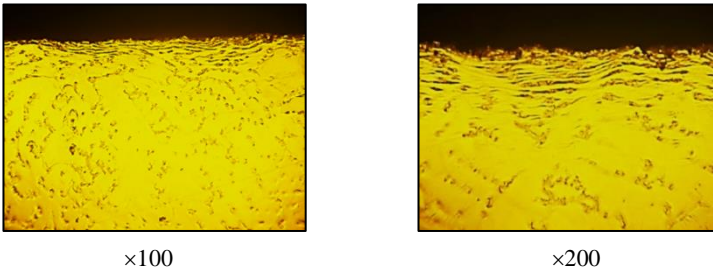


Рисунок 8 – Мікроструктура поверхневого шару зразка із бронзи BrO3A3 після закінчення його випробувань на сухе тертя.

Як свідчать результати досліджень [10], бронза BrO3A3 має двофазну структуру – α -Cu^I та β -Cu₅Sn (див. рис. 7, а). Бронза BrO5Ц5С5 складається з α -Cu твердого розчину, залишкової від евтектоїдної реакції фази β -Cu₅Sn та продуктів її евтектоїдного перетворення

α -Cu+ δ -Cu₃₁Sn₈, а також кристалів Pb (див. рис. 7, б). Мікроструктура

алюміній-залізної бронзи БрА9ЖЗЛ представлена α -Cu первинними кристалами та продуктами евтектоїдного перетворення β -Cu₃Al \rightarrow α -Cu + γ_2 -Cu₉Al₄ (див. рис. 7, в) [16].

З цього витікає, що бронзи БрО5Ц5С5 та БрА9ЖЗЛ поступаються бронзі БрО3А3 за показниками зносостійкості через те, що у їх складі присутні дрібно-диференційовані кристали твердих і крихких фаз δ -Cu₃₁Sn₈ (в евтектоїдних структурних складових) у бронзі БрО5Ц5С5 та γ_2 -Cu₉Al₄ у бронзі БрА9ЖЗЛ [16]. В той самий час, стабілізована фаза β -Cu₅Sn ($H\mu=4985\dots5275$ МПа) в бронзі БрО3А3 у якості твердої, зносостійкої, армуючої складової зберігається в структурі без твердофазного перетворення і має подібну за сингонією до α -Cu ($H\mu=1142\dots1887$ МПа) твердого розчину ОЦК ґратку [17]. Як результат (див. рис. 8), стабілізована фаза β -Cu₅Sn в бронзі БрО3А3 під час тертя переважно залишається у матриці бронзи – α -Cu, накопичуючись у поверхневому шарі робочої поверхні, а сама α -Cu фаза завдяки своїй пластичності для твердої, але не крихкої β -Cu₅Sn-фази у даному випадку є змащувальним матеріалом в осередку деформації.

Виходячи з викладеного вище, можна припустити, що механізм зношування бронзи БрО3А3 складається з 4 етапів, схематичне зображення яких представлені на рис. 9.

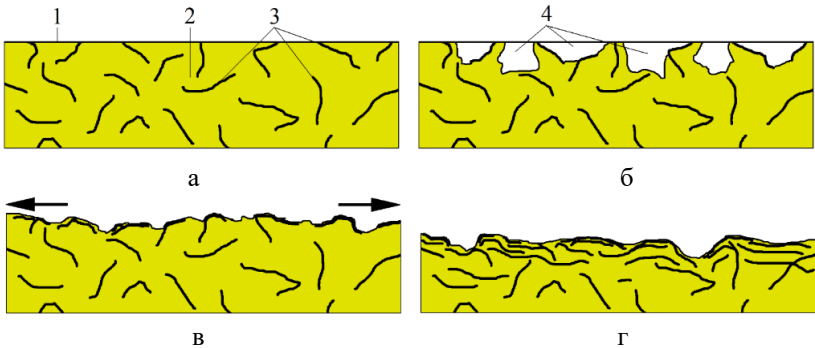


Рисунок 9 – Схема зношування поверхнього шару зразка до початку випробувань (а), на початку випробувань (б), впродовж випробувань (в), по завершенню випробувань (г): 1 - поверхня контакту зразка з контртілом; 2 - α -Cu^I фаза; 3 - β -Cu₅Sn фаза; 4 - локальні вириви з поверхні зразка α -Cu^I фази.

Етап 1 (до початку випробувань) – на поверхні тертя, у підповерхневому шарі та у глибині зразка мікроструктура однакова (див. рис. 9,а).

Етап 2 (початок випробувань) – за рахунок навантаження на зразок та його обертання в області осередка деформації поверхневий шар починає деформуватися, що циклічно супроводжується пластичною

течією бронзи з-під осередка деформації, виникають адгезійні сили між поверхнею контртіла та зразка, які у міру збільшення приводять до виривів з поверхні зразка часток α -Cu¹ фази (див. рис. 9,б).

Етап 3 (випробування) – у міру зношування зразка за рахунок пластичної течії бронзи на торці зразків, втрати α -Cu¹ фази тертям або виривом контртілом, кількість β -Cu₅Sn фази у поверхневому шарі зростає. При цьому ця тверда фаза, маючи високу пластичність, не викришується, а закочується у залишкову на поверхні α -Cu¹ фази. На цьому етапі суттєве підвищення твердої фази у поверхневому шарі призводить до зменшення зношування зразка та надає його робочій поверхні коричневого кольору (див. рис. 9,в).

Етап 4 (завершення випробування) – мікроструктура поверхневого шару по завершенню випробувань являє собою композитний матеріал у якому об'ємна доля твердої (β -Cu₅Sn) фази співставна з часткою пластичної (α -Cu¹) фази і є результатом багатофакторного процесу, притаманному виключно тертю по сухому та матеріалу у якому матриця під час тертя являє собою мастильний матеріал (див. рис. 9,г).

Для визначення впливу вмісту алюмінію та олова в бронзі в їх оптимізованих інтервалах концентрацій на коефіцієнт тертя сплаву БрО3А3 проти контртіла «кулька ШХ15» експериментально встановили величину k для зразків міді М2 та бронз БрО3А3, БрА7, БрО8.

Результати випробувань бронзи БрО3А3 були оброблені шляхом розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь за методом Крамера. Можливість використання метода Крамера у даній роботі пояснюється тим, що матриця коефіцієнтів при перемінних у математичній моделі (5) після цілеспрямованих перетворень приймає діагональний вигляд. Це дозволяє визначати відповідні невідомі.

Вихідні дані для складання системи лінійних алгебраїчних рівнянь та її розв'язання методом Крамера наведено в таблиці 4.

Таблиця 4 - Вихідні дані для складання системи лінійних рівнянь.

Cu, %	Al, %	Sn, %	(Al·Sn) ^а	k
93,32	6,65	0,00	0,000	0,301
91,80	0,00	7,91	0,000	0,356
100,00	0,00	0,00	0,000	0,404
92,96	3,63	3,24	1,852	0,263

Обробку даних таблиці проводили розв'язанням вирішення наступної системи лінійних рівнянь:

$$\begin{cases} y_1 = A_1 \cdot 93,32 + A_2 \cdot 6,65 + A_3 \cdot 0,00 + A_4 \cdot 0,000, \\ y_2 = A_1 \cdot 91,80 + A_2 \cdot 0,00 + A_3 \cdot 7,91 + A_4 \cdot 0,000, \\ y_3 = A_1 \cdot 100,00 + A_2 \cdot 0,00 + A_3 \cdot 0,00 + A_4 \cdot 0,000, \\ y_4 = A_1 \cdot 92,96 + A_2 \cdot 3,63 + A_3 \cdot 3,24 + A_4 \cdot 1,852, \end{cases} \quad (5)$$

де величину α прийнято рівною 0,25.

Результат розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь (визначення коефіцієнтів) методом Крамера має вигляд:

$$k = 0,00404 \cdot \text{Cu} - 0,01143 \cdot \text{Al} - 0,00188 \cdot \text{Sn} - 0,03508 \cdot (\text{Al} \cdot \text{Sn})^{0,25}, \quad (6)$$

де Cu, Al, Sn – масовий вміст у бронзі БрОЗА3, відповідно, Cu, Al, Sn, %.

При цьому, межі змін вмісту основних компонентів у досліджених бронзах, що визначають можливість застосування формули (6), становлять Al < 6,65% та Sn < 7,91%.

Враховуючи, що оптимізований в наявній роботі сплав БрОЗА3 містить олова та алюмінію 3...4 % (мас.) кожного, то вказані концентрації відповідають граничним масовим відсоткам основних компонентів у досліджених бронзах. Тобто залежність (6) можна використовувати для визначення та оптимізації показника коефіцієнта тертя за рахунок підбору відповідних масових значень основних компонентів бронзи БрОЗА3.

Залежності коефіцієнта тертя ковзання потрійних сплавів БрОЗА3 від вмісту в них алюмінію та олова представлені на рис. 10.

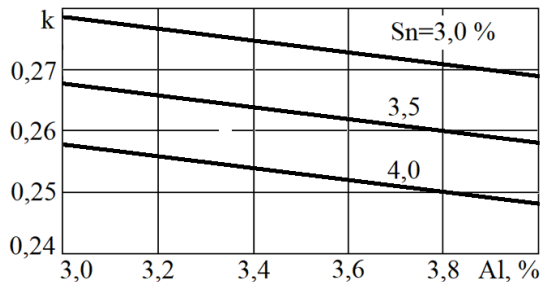


Рисунок 10 – Залежності коефіцієнта тертя ковзання потрійних сплавів БрОЗА3 від вмісту в них Al та Sn.

Аналіз ходу залежностей на рис. 10 свідчить, що коефіцієнт тертя бронзи БрОЗА3 знижується з підвищенням в ній вмісту як олова, так і алюмінію. Така закономірність пояснюється тим, що зі збільшенням Al та Sn в бронзі кількість β -Cu₅Sn фази підвищується в її структурі і твердофазний її розпад не відбувається.

Результати визначення коефіцієнтів тертя «по-сухому» міді та інших

бронз проти контртіла «кулька ШХ15» за прийнятою методикою наведені в таблиці 5.

Аналіз даних табл. 5 свідчить про те, що величина коефіцієнта тертя сталі ШХ15 по бронзі БрО3А3 аналогічна величині для бронзи БрО5Ц5С5 і нижче, ніж у міді та бронз БрО8, БрА7 і БрА9Ж3Л.

Таблиця 5 – Коефіцієнт тертя «по-сухому» міді та бронз.

Марка бронзи, мідь	k	Марка бронзи	k
Мідь М2	0,400-0,408	БрА9Ж3Л	0,293-0,303
БрО8	0,336-0,356	БрО5Ц5С5	0,247-0,275
БрА7	0,282-0,301	БрО3А3	0,247-0,277

Висновки

1. Встановлено, що бронза БрО3А3 має більш високий рівень опору зношування при сухому терті (відносна втрата маси – 0,8 %, діаметру – 0,5 % від їх вихідних величин) порівняно з бронзами БрО5Ц5С5 (відповідно, 7,0 % і 6,3 %) та БрА9Ж3Л (відповідно 1,7 % і 1,5 %).

2. Вірогідно, що висока зносостійкість бронзи БрО3А3 зумовлена наявністю у її структурі твердої фази β -Cu₃Sn, яка під час сухого тертя за рахунок адгезійного вириву з структури м'яких (α -Cu) фрагментів бронзи та її пластичної течії під дією навантаження на неї не тільки накопичується у її поверхневому шарі, але і поширено вибудовується вздовж напрямку течії бронзи.

3. Величина коефіцієнту тертя бронзи БрО3А3 складає 0,25...0,28, що співпадає з довідковими даними для бронзи БрО5Ц5С5. При цьому, з підвищенням вмісту як олова, так і алюмінію коефіцієнт тертя бронзи БрО3А3 знижується.

4. Отримані дані є підставою рекомендувати бронзу БрО3А3 у якості триботехнічного матеріалу в вузлах тертя замість відомих бронз марок БрО5Ц5С5 та БрА9Ж3Л.

Перелік посилань

1. *Материаловедение* : учебник для вузов / Под общ. ред. Б. Н. Арзамасова, Г. Г. Мухина. 5-е изд., стереотип. Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 648 с.
2. Лахтин Ю. М. *Материаловедение и термическая обработка металлов*. Учебник для вузов. 3-е изд. Москва : Металлургия, 1983. 360 с.
3. Меркулова Г. А. *Материаловедение и термическая обработка цветных сплавов* : учеб. пособ. Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2008. 312 с.
4. Microstructure and Properties of Thermally Sprayed Al-Sn-Based Alloys for Plain Bearing Applications / T. Marrocco, L. C. Driver, S. J. Harris, D. G. McCartney // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2006. Vol. 15. No 4. P. 634-639.
5. Kryachek V. M. Sintered metals and alloys friction Composites: Traditions and New Solutions (review). II. Composite materials. *Powder metallurgy and Metal Ceramics*. 2005. Vol. 44. No. 1-2. P. 5-15.

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. Полухин М. С., Камынин В. В. Влияние структурных факторов на триботехнические свойства антифрикционных чугунов. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2011. Т. 7. С. 43-47.
8. Тавров В. И. К обоснованию выбора материала для подшипника скольжения. Факторы, определяющие выбор материала. *Электронный научно-технический журнал Инженерный вестник*. 2012. № 12. 77- 48211/513921.
9. Гуляев А. П. *Металловедение*. Москва: Металлургия, 1986. 544 с.
10. Кімстач Т. В., Узлов К. І., Реп'ях С. І., Солоненко Л. І. 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. <https://doi.org/10.30838/J.PMNTM.2413.050722.41.858>
11. ASTM E3 – 11 (2017) Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens.
12. Попилов Л. Я., Зайцева Л. П. *Электрополирование и электро травление металлографических шлифов*. Москва : Металлургиздат, 1963. 410 с.
13. Коваленко В. С. *Металлографические реактивы*. Москва : Металлургия, 1981. 120 с.
14. Беккерт М., Клемм Х. *Способы металлографического травления : справочное издание*. [Перевод с нем.]. Москва : Металлургия, 1988. 400 с.
15. Гончаров О. А., Васильева Л. В., Юнда А. М. *Чисельні методи розв'язання прикладних задач* : навч. посіб. Суми : Сумський державний університет, 2020. 142 с.
16. Узлов К. І., Реп'ях С. І., Дзюбіна А. В., Кімстач Т. В., Мовчан О. В. Аналіз відповідності нормативних вимог до алюмінієвих бронз закономірностям структуроутворення в системі Cu-Al. *Теорія і практика металургії*. 2019. №5 (122). С. 55–63. <https://doi.org/10.34185/tpm.5.2019.07.7>
17. 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 БрОЗА3 на її механічні властивості. *Теорія і практика металургії*. 2021. № 4 (129). С. 41–47. <https://doi.org/10.34185/tpm.4.2021.05>.

References

1. Arzamasov, B. N., Makarova, V. I., & Muhin, G. G. (2003). *Materialovedenie*. Publishing house of MSTU named after N.E. Bauman
2. Lahtin, Yu. M. (1983). *Materialovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. Metallurgiya
3. Merkulova, G. A. (2008). *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka cvetnykh splavov*. Sib. feder. University
4. Marrocco, T., Driver, L. C., Harris, S. J., & McCartney, D. G. (2006). Microstructure and Properties of Thermally Sprayed Al-Sn-Based Alloys for Plain Bearing Applications. *Journal of Thermal Spray Technology*, 15(4), 634-639
5. Kryachek, V. M. (2005) Sintered metals and alloys friction Composites: Traditions and New Solutions (review). II. Composite materials. *Powder metallurgy and Metal Ceramics*, 44, 1-2, 5-15
6. Hreshta, V. L., Lysytsia, O. V., & Stepanova, L. P. (2014) *Kolorovi metaly ta*

splavy na yikh osnovi. ZNTU

7. Poluhin, M. S., & Kamynin, V. V. (2011). Vliyanie strukturnykh faktorov na tribotekhnicheskie svoystva antifrikcionnykh chugunov. *Bulletin of Voronezh State Technical University*, 7, 43-47
8. Tavrov, V. I. (2012). K obosnovaniyu vybora materiala dlya podshipnika skol'zheniya. Faktory, opredelyayushchie vybor materiala. *Electronic scientific and technical journal Engineering Bulletin*, 12, 77- 48211/513921
9. Gulyaev, A. P. (1986). *Metallovedenie*. Metallurgy
10. Kimstach, T. V., Uzlov, K. I., Rep'yah, S. I., & Solonenko, L. I. (2022). Optimizing the content of tin and aluminum in tin bronze according to the indicators of mechanical properties indicators. *Metal science and thermal processing of metals*, 2 (97), 41–54. <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.050722.41.858>
11. ASTM E3 - 11(2017) Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens
12. Popilov, L. Ya., & Zajceva, L. P. (1963) *Elektropolirovanie i elektrotravlenie metallograficheskikh shlifov*. Metallurgizdat
13. Kovalenko, V. S. (1981). *Metallograficheskie reaktivy*. Metallurgizdat
14. Bekkert, M., & Klemm, H. (1988). Sposoby metallograficheskogo travleniya: spravocnoe izdanie. Metallurgizdat
15. Goncharov, O. A., Vasil'eva L. V., & Yunda, A. M. (2020). Chisel'ni metodi rozv'yazannya prikladnih zadach navch. posib [Numerical methods of solving applied problems: teaching. manual]. Sumy State University
16. Uzlov, K. I., Rep'yah, S. I., Dzyubina, A. V., Kimstach, T. V., & Movchan, O. V. (2019) Analiz vidpovidnosti normativnih vimog do alyuminievih bronz zakonodirnostyamy strukturoutvorenniya v sistemi Su-Al [Analysis of the compliance of regulatory requirements for aluminum bronzes with the patterns of structure formation in the Cu-Al system]. *Theory and practice of metallurgy*, 5 (122), 55–63. <https://doi.org/10.34185/tpm.5.2019.07>
17. Kimstach, T. V., Uzlov, K. I., Solonenko, L. I., Rep'yah, S. I., Hrichikov V., Bilij, O. P., Bilij A. P., & Ivanova, L. H. (2021). Doslidzhennya vplivu domishok v bronzi BrO3A3 na її mekhanichni vlastivosti [Study of the effect of impurities in BrO3A3 bronze on its mechanical properties]. *Theory and practice of metallurgy*, 4 (129), 41–47. <https://doi.org/10.34185/tpm.4.2021.05>

K. I. Uzlov¹, D. Sc. (Tech.), Prof., ORCID 0000-0003-0744-9890

S. I. Repyakh¹, D. Sc. (Tech.), Prof., ORCID 0000-0003-0203-4135

T. V. Kimstach^{1,2}, Ph. D. (Tech.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-8993-201X

O. A. Safronova², Junior Research, Ph. D. Student, ORCID 0000-0002-4032-4275

V. F. Mazorchuk¹, Ph. D. (Tech.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-8512-0727

A. P. Bilyi¹, Ph. D. Student, ORCID 0000-0003-2905-7046

¹ Ukrainian State University of Science and Technologies

² Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine

TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF BRO3A3 ALLOY UNDER DRY FRICTION CONDITIONS

Abstract. Currently, lead and tin bronzes are most often used for the production of bearings, which is due to their high level of tribotechnical properties and reliability in operation. At the same time, the ban in the European Union on the use of lead in any products led to the need to find environmentally safe bronzes with a similar or increased level of tribotechnical properties. A promising way to solve this problem is BrO3A3 bronze, the microstructure of which fully meets the requirements for bearing alloys. However, to date, the tribotechnical properties of BrO3A3 bronze have not been investigated. Therefore, the task of researching the tribotechnical properties of cast bronze BrO3A3 as a bearing alloy is urgent. The purpose of the work is to establish the values of relative wear resistance and friction coefficient, as parameters by which it is possible to recommend the use of cast bronze of the BrO3A3 brand as an antifriction material. Wear resistance tests according to the "disk-disk" scheme were carried out in accordance with the requirements of State and International standards on a mod machine. SMC-2 under a load of 45 kg (441 N) in friction-rolling conditions with a slip of 10% at room temperatures. Tribotechnical tests of the samples of the investigated bronzes according to the "ball-disc" scheme were carried out under dry friction-sliding conditions on the "Micron-tribo" friction machine in accordance with the International Standards DIN 50324 and ISO 20808. The microstructure was studied using a NEOPHOT 21 optical microscope with a magnification of up to 1000 times. According to the results of the study, it was found that compared to BrO5C5C5 and BrA9Zh3L bronzes, BrO3A3 bronze is characterized by a higher level of resistance to wear during dry rubbing, which is due to the presence of a hard but plastic phase in its structure β -Cu₅Sn. The value of the coefficient of friction of BrO3A3 bronze coincides with the similar coefficient of BrO5C5S5 bronze and is lower than that of pure copper and bronzes of BrO8, BrA5 and BrA9Zh3L brands. At the same time, with an increase in the content of both tin (from 3 to 4% by mass) and aluminum (from 3 to 4% by mass), the coefficient of friction of BrO3A3 bronze decreases from 0.28 to 0.25. The research results are a reason to recommend BrO3A3 bronze as a tribotechnical material in friction nodes to replace not only lead bronzes and BrO5C5S5 bronzes, but also BrA9Zh3L bronzes.

Key words: bronze, wear resistance, friction, mass, phase, aluminum, tin, lead.

For citation: Uzlov, K. I., Repyakh, S. I., Kimstach, T. V., Safronova, O. A., Mazorchuk, V. F., & Bilyi, A. P. (2023). Tribotechnical properties of BRO3A3 alloy under dry friction conditions. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 37, 505-521. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-505-521>

*Стаття надійшла до редакції збірника 29.09.2023 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 9 від 19.12.2023 р.)*