

УДК 691.73:620.193.2

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.300824.134.1084

ДОСЛІДЖЕННЯ КОРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ЛИВАРНОЇ ТРИБОТЕХНІЧНОЇ БРОНЗИ БрО3А3

УЗЛОВ К. І.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
КІМСТАЧ Т. В.^{2*}, *канд. техн. наук, доц.*,
РЕП'ЯХ С. І.³, *докт. техн. наук, проф.*,
КОВЗІК А. М.⁴, *канд. техн. наук, доц.*,
РЕМЕЗ О. А.⁵, *канд. техн. наук, доц.*

¹ Кафедра матеріалознавства та термічної обробки металів, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 950-14-08, e-mail: konst.uzlov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0744-9890

^{2*} Кафедра матеріалознавства та термічної обробки металів, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна; Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Академіка Стародубова, 1, 49107, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 567-85-61, e-mail: 1375tatjana@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8993-201X

³ Кафедра ливарного виробництва, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 592-70-95, e-mail: 123rs@ua.fm, ORCID ID: 0000-0003-0203-4135

⁴ Кафедра покриттів, композиційних матеріалів і захисту металів, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 481-00-10, e-mail: anatoliykovzik@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5361-6381

⁵ Кафедра обробки металів тиском ім. Академіка Чекмарьова, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (098) 757-31-82, e-mail: o.a.remez@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-5489-8798

Анотація. Постановка проблеми. Бронзи були та залишаються основним матеріалом для виготовлення підшипників тертя, антифрикційних та корозійностійких деталей, що працюють в умовах високих навантажень, у хімічно активних середовищах, за низьких та підвищених температур, в умовах кавітації, ерозії тощо. Тобто безперервний розвиток техніки потребує від антифрикційних бронз постійного підвищення їх корозійної стійкості як фактора, що дозволить значно розширити сферу їх застосування, підвищити довговічність та надійність литих виробів із них. **Мета.** На основі аналізу взаємозв'язку корозійних пошкоджень із хімічним складом порівняти корозійну стійкість бронзи БрО3А3 із корозійною стійкістю бронз марок БрА5, БрА9Ж3Л та БрО5Ц5С5, як матеріалів, що найчастіше використовуються у промисловості для виготовлення деталей, які працюють у вузлах тертя та хімічно активних середовищах. **Методика.** Сплави для виготовлення зразків готували шляхом сплавлення первинних шихтових матеріалів технічної чистоти. Плавки проводили в індукційній печі з використанням графітового тигля і деревного вугілля як покривного матеріалу. Дослідження корозійної стійкості литих зразків бронз здійснювали відповідно до вимог ISO 7384:2001, ISO 11845:1995 та ГОСТ 9.308-85. Корозійну стійкість досліджуваних зразків оцінювали за результатами відносної втрати їх маси під час витримки протягом 90 діб у клімат-камері за відносної вологості повітря $93 \pm 3\%$ та температури 40 ± 2 °C, у морській та прісній воді з температурою 20...22 °C. **Висновки.** Бронза БрО3А3, із-поміж досліджених ливарних бронз, характеризується найкращим рівнем антикорозійних властивостей в усіх використаних у дослідженнях середовищах. У зв'язку з чим це є підставою рекомендувати досліджену бронзу для виготовлення литих деталей триботехнічного призначення, які працюють на повітрі, у прісній або морській воді.

Ключові слова: бронза; корозійна стійкість; зміна маси; мікроструктура; клімат-гідрокамера; прісна вода; морська вода

FOUNDRY TRIBOTECHNICAL BRONZE BrO3A3 CORROSION RESISTANCE INVESTIGATION

UZLOV K.I.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
KIMSTACH T.V.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
REPYAKH S.I.³, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
KOVZIK A.M.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
REMEZ O.A.⁵, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

¹ Department of Material Science and Heat Treatment of Metals, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (067) 950-14-08, e-mail: konz.uzlov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0744-9890

^{2*} Department of Material Science and Heat Treatment of Metals, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine; Department of Problems of Deformation and Thermal Treatment of Structural Steel, Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of National Academy of Science of Ukraine, 1, Ak. Starodubov K.F. Sq., Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (097) 567-85-61, e-mail: 1375tatyana@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8993-201X

³ Department of Casting Production, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. + 38 (050) 592-70-95, e-mail: 123rs@ua.fm, ORCID ID: 0000-0003-0203-4135

⁴ Department of Coatings, Composite Materials and the Protection of Metals, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (050) 481-00-10, e-mail: anatoliykovzvik@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5361-63810

⁵ Department of Metal Forming, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (098) 757-31-82, e-mail: o.a.remez@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-5489-8798

Abstract. Problem statement. Bronzes have been and remain the main material for friction bearings, anti-friction and corrosion-resistant parts manufacturing that work under high loads, chemically active aggression influence at low and elevated temperatures, in cavitation, erosion, etc. conditions. That is, technology continuous development requires from anti-friction bronzes constant their corrosion resistance increasing, as a factor that will allow to significantly expand their application scope and increase cast products from them durability and reliability. *The purpose of the articles.* Based on relationship between corrosion damages and chemical composition analysis, compare BrO3A3 bronze corrosion resistance with BrA5, BrA9Zh3L and BrO5Tz5C5 bronzes corrosion resistance as the materials most often used in industry for parts manufacturing that work in friction nodes and chemically active environments. *Methodology.* Alloys for samples production have been prepared by technical purity primary charge materials fusing. Melting has been carried out in induction crucible furnace using a graphite crucible and charcoal as a coating material. Cast bronze samples corrosion resistance studies have been carried out in accordance with ISO 7384:2001, ISO 11845:1995 and GOST 9.308-85 requirements. Studied samples corrosion resistance has been evaluated based on the results of their relative weight loss during exposure for 90 days in climate chamber at relative humidity of 93 ± 3 % and temperature of 40 ± 2 °C, in sea and fresh water with temperature of 20...22 °C. *Conclusions.* BrO3A3 bronze, among the studied foundry bronzes, is characterized by the best level of anti-corrosion properties in all environments used in this research. In this regard, it is a reason to recommend the studied bronze for tribotechnical purpose cast parts manufacturing, which work in air, fresh or sea water.

Keywords: *bronze; corrosion resistance; mass change; microstructure; climatic hydro-chamber; fresh water; sea water*

Актуальність. Основні причини виходу з ладу антифрикційних деталей та вузлів – це їх корозійне руйнування під час роботи в атмосферних умовах та агресивних середовищах, зношення у парах тертя та ерозія робочих поверхонь. У зв'язку з цим дослідження корозійної стійкості антифрикційних матеріалів постає важливим напрямком у галузі матеріалознавства. Один із таких матеріалів – ливарна триботехнічна бронза, яка широко застосовується в різних інженерних галузях, включаючи машинобудування, авіацію, суднобудування та інші.

Безперервний розвиток техніки потребує від триботехнічних бронз постійного підвищення їх корозійної стійкості як фактора, що дозволить значно розширити сферу їх застосування, підвищити довговічність та надійність литих виробів із них. Також підвищення корозійної стійкості

бронз дає суттєві економічні переваги внаслідок збільшення терміну служби обладнання, зниження витрат на його обслуговування та ремонт, а також скорочення втрат через простої та ризику.

Дослідження корозійної стійкості бронз мають велике значення для розроблення ефективних захисних методів та оптимізації умов експлуатації. Корозія може значно скорочувати термін служби та ефективність матеріалу, тому розуміння процесів корозії та знаходження способів запобігання їй стає важливим завданням в інженерії матеріалів.

Дослідження також можуть сприяти розробленню та впровадженню у виробництво нових складів сплавів із поліпшеною корозійною стійкістю, які можуть працювати в агресивних середовищах протягом тривалого часу без значного зниження якості та втрати маси.

Один із перспективних напрямів отримання корозійностійкої бронзи з високими рівнем антифрикційних властивостей – це легування її водночас оловом та алюмінієм [1; 2]. Тому дослідження корозійної стійкості нової литої бронзи БрО3А3 як підшипникового сплаву бачиться актуальним.

Стан питання. Велика різноманітність конструктивних типів вузлів тертя, а також умов експлуатації викликає необхідність створення різноманітних триботехнічних матеріалів, які, крім високих механічних, технологічних та антифрикційних властивостей, повинні мати необхідну корозійну стійкість. Цим вимогам найкраще відповідають мідні сплави, зокрема, бронзи.

Досить висока корозійна стійкість мідних сплавів зумовлена підвищеною термодинамічною стійкістю міді. Бронзи мають більш високу корозійну стійкість порівняно з чистою міддю завдяки наявності в їх складі легувальних елементів, які здатні утворювати стійкі захисні плівки [3]. Зазвичай у разі легування міді більш термодинамічно стійкими елементами на поверхні сплаву формується плівка, яка складається в основному з оксиду міді, що зумовлено меншим значенням тиску дисоціації оксиду міді. У разі легування міді менш термодинамічно стійкими елементами

на поверхні сплаву утворюється плівка, що має складний вміст [4].

Найширше застосування в промисловості як антифрикційні корозійностійкі матеріали отримали олов'яні та алюмінієві бронзи.

Олов'яні бронзи мають високі антифрикційні властивості, низький коефіцієнт тертя, високий опір зношуванню і, разом із тим, досить високу корозійну стійкість [5]. Їх в основному використовують для виготовлення антифрикційних деталей, вкладишів підшипників, деталей, що працюють у мастил тощо.

В атмосферних умовах та в морському середовищі олов'яні бронзи більш стійкі, ніж мідь та латунь. Олов'яні бронзи мають задовільну стійкість проти корозії в атмосфері перегрітого пару (250 °С, тиск не вище 2 МПа), сухих газів (хлору, бром, фтору та їх водневих сполук; кисню та чотирихлористого вуглецю). Проте олов'яні бронзи недостатньо стійкі в середовищі мінеральних кислот, лугів, аміаку, ціанідів, залізних та сірчаних сполук кислих рудних вод [5].

Швидкість корозії бронз БрО5 та БрО8 в атмосфері сільської місцевості становить 0,00015–0,0008 мм/рік, у морській атмосфері 0,001–0,002 мм/рік, у промисловій атмосфері 0,0015–0,0018 мм/рік [3; 6; 7].

Дані щодо корозії олов'яних бронз у різних середовищах наведені в таблиці 1 [3; 6; 8].

Таблиця 1

Корозійна стійкість олов'яних бронз у різних середовищах [3; 6; 8]

| Марка бронзи | Морська вода, мм/рік | Морський туман | Суша пара | Волога пара | Розчин H ₂ SO ₄ | | | | Розчин NaCN 2-н 20 ° |
|--------------|----------------------|----------------|--|-------------|---------------------------------------|------|------|------|----------------------|
| | | | 250 °С | 100 °С | 10 % | 55 % | 10 % | 55 % | |
| | | | $\frac{g}{(m^2 \cdot доба)}$ мм / рік | | $\frac{g}{(m^2 \cdot доба)}$ | | | | |
| БрО5 | 0,02 | – | – 0,0025 | – 0,0025 | – | – | – | – | 0,89 |
| БрО10 | 0,016 | – | – | – | 4,1 | 1,26 | 23,8 | 7,1 | – |
| БрО10Ц2 | 0,018 | <u>0,06</u> | <u>0,02</u> | <u>0,02</u> | 3,5 | 0,53 | 15,6 | 4,6 | – |
| БрО6Ц6С3 | 0,028 | – | – | – | 4,9 | 0,4 | 17,6 | 5,6 | – |

Досить висока корозійна стійкість олов'яних бронз пояснюється утворенням на поверхнях у природних умовах захисних шарів.

Зі збільшенням вмісту олова корозійна стійкість олов'яних бронз помітно підвищується. Підвищенню корозійної

стійкості олов'яної бронзи також сприяє легування нікелем. Залізо та свинець значно знижують корозійні властивості олов'яних бронз [6].

Найбільшого поширення серед ливарних безолов'яних бронз набули алюмінієві бронзи, які порівняно з олов'яними мають вищий рівень корозійної та кавітаційної стійкості [3; 5; 7].

Алюмінієві бронзи знайшли застосування в морському кораблебудуванні, загальному машинобудуванні, авто- та авіабудуванні. Ливарні багатокомпонентні алюмінієві бронзи широко використовують для виготовлення антифрикційних деталей (наприклад, із сплавів БрА9Мц2Л та

БрА10Мц2Л – зубчасті колеса, шестерні, ходові гайки, втулки).

Алюмінієві бронзи відрізняються високою корозійною стійкістю в атмосферних умовах, морській воді, вуглекислих розчинах, а також розчинах більшості органічних кислот (оцтової, лимонної, молочної та ін.).

Алюмінієві бронзи значно перевершують за корозійною стійкістю метали міді із цинком і оловом. У розчинах сірчано-кислих солей, їдких лугів та виннокам'яної солі більш стійкі однофазні алюмінієві бронзи зі знизеним вмістом алюмінію [6].

Дані щодо корозії алюмінієвих бронз у різних середовищах наведені в таблиці 2 [6; 8].

Таблиця 2

Корозійна стійкість алюмінієвих бронз у різних середовищах [6; 8]

| Марка бронзи | Морська вода, мм/рік | Розчин H ₂ SO ₄ | |
|--------------------------|----------------------|---------------------------------------|-------------|
| | | 10 % | Волога пара |
| | | 20 °C | 100 °C |
| г/(м ² ·доба) | | | |
| БрА5 | 0,55 | 1,2 | – |
| БрА9Ж4Л | 0,20–0,25 | 0,40 | 1,45 |
| БрА10Ж3Мц1,5Л | 0,20–0,25 | 0,7 | – |
| БрА10Ж4Н4Л | 0,18 | 0,58 | – |

Додаткове легування алюмінієвих бронз іншими елементами суттєво змінює їх властивості. Для підвищення корозійної стійкості та поліпшення механічних і технологічних властивостей алюмінієві бронзи в основному легують Mn, Ni, Fe.

Легування марганцем підвищує міцність, пластичність, корозійну стійкість алюмінієвої бронзи та поліпшує її обробку тиском. Нікель поліпшує механічні властивості, корозійну стійкість, підвищує жароміцність та антифрикційні властивості. Залізо підвищує міцність, твердість за деякого зниження пластичності, поліпшує антифрикційні властивості алюмінієвої бронзи. Однак підвищений вміст заліза погіршує технологічні та корозійні характеристики бронз.

У галузі виробництва підшипників тертя олов'яні бронзи, завдяки високим антифрикційним властивостям, більше поширені, ніж алюмінієві. Алюмінієві бронзи

характеризуються вищою корозійною стійкістю порівняно з олов'яними бронзами.

Однак серед великої кількості літературних джерел, у яких описано поведінку алюмінієвих та олов'яних бронз у різних середовищах, практично немає робіт, у яких розглядається спільний вплив алюмінію та олова на корозійну стійкість бронз. За даними [1; 2], легування бронзи водночас оловом та алюмінієм дозволяє отримати сплави з високими міцнісними, антифрикційними властивостями та високою корозійною стійкістю.

Із цього погляду, на сьогодні найбільш перспективна нова бронза БрОЗА3, яка має високі ливарні та антифрикційні властивості, твердість і необхідний рівень механічних властивостей [9].

Та все ж наразі будь-які дані щодо корозійної стійкості бронзи БрОЗА3 відсутні, що стало підставою для проведення відповідних досліджень.

Мета дослідження. На основі аналізу величини та характеру зміни маси досліджуваних зразків та взаємозв'язку корозійних пошкоджень із хімічним складом порівняти корозійну стійкість бронзи БрО3А3 із корозійною стійкістю бронз марок БрА5, БрА9ЖЗЛ та БрО5Ц5С5 як матеріалів, що найчастіше використовуються у промисловості для виготовлення деталей, які працюють у вузлах тертя та хімічно активних середовищах.

Методика досліджень. Корозійну стійкість визначали на зразках, виготовлених із бронз марок БрО3А3, БрА5, БрА9ЖЗЛ та БрО5Ц5С5 на зразках $\varnothing 30 \times 3$ мм із технологічним отвором $\varnothing 3$ мм у центрі. Зразки вирізали механічним способом,

використовуючи виливки циліндричної форми $\varnothing 32 \times 130$ мм, відлиті у ливарні форми з піщано-рідкоскляної суміші.

Для досліджень сплави готували шляхом сплавлення первинних шихтових матеріалів технічної чистоти в графітовому тиглі індукційній печі під шаром деревного вугілля як покривного матеріалу. Як шихту використовували мідь марки М1, олово марки О2, свинець марки С3, сталь марки Ст3, цинк марки Ц1, алюміній марки А7. Температуру вимірювали хромель-алюмелевою термопарою у комплекті з потенціометром АТ4208.

Хімічний склад бронз, які досліджували для порівняння, наведений в таблиці 3. Загальний вигляд зразків показаний на рисунку 1.

Таблиця 3

Хімічний склад зразків досліджуваних бронз

| Марки бронз | Вміст елементів, масова частка % (залишок – Cu) | | | | | |
|-------------|---|------|------|------|------|------|
| | Al | Fe | Sn | Si | Pb | Zn |
| БрО3А3 | 3,38 | 0,13 | 4,16 | 0,09 | 0,07 | – |
| БрА5 | 4,97 | 0,13 | – | 0,23 | 0,06 | – |
| БрА9ЖЗЛ | 8,62 | 3,68 | – | 0,14 | – | – |
| БрО5Ц5С5 | – | 0,13 | 4,82 | – | 4,52 | 4,70 |



Рис. 1. Вигляд зразків із бронз БрО3А3 (а), БрА5 (б), БрА9ЖЗЛ (в), БрО5Ц5С5 (г) до початку їх випробувань на корозійну стійкість

Дослідження здійснювали відповідно до вимог ISO 7384:2001, ISO 11845:1995 та ГОСТ 9.308-85.

Для випробувань пласкі поверхні зразків шліфували. До випробувань допускали лише зразки, які не мали поверхневих дефектів і задирок на торцях отвору та їх зовнішній циліндричній поверхні. Потім вимірювали розміри кожного зразка електронним штангенциркулем з точністю 0,01 мм.

Використовуючи ці дані зразків, розраховували загальну площу (S_3) їх реакційної поверхні за формулою:

$$S_3 = 2(S_{\text{П}} - S_{\text{ПО}}) + S_{\text{БЗ}} + S_{\text{БО}}, \quad (1)$$

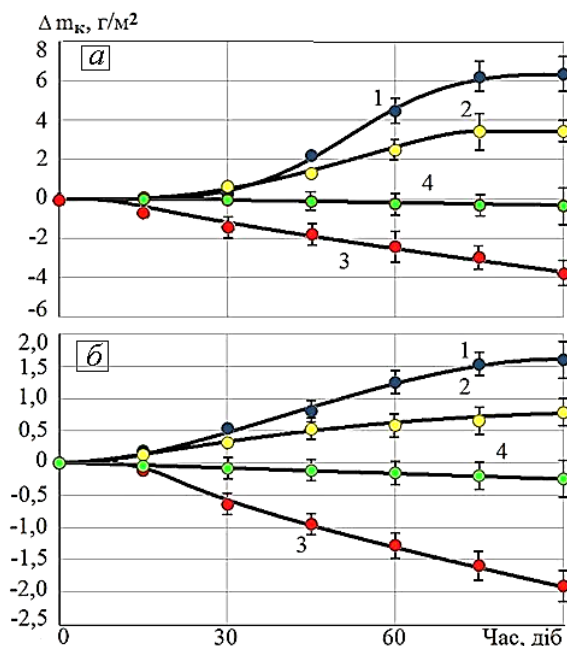
де $S_{\text{П}}$, $S_{\text{ПО}}$ – площа однієї пласкої поверхні зразка та гіпотетичної пласкої поверхні отвору відповідно; $S_{\text{БЗ}}$ – площа зовнішньої циліндричної поверхні зразка; $S_{\text{БО}}$ – площа циліндричної поверхні отвору.

Зважували зразки до початку випробувань, а також через кожні 15 діб впродовж 90 діб, на аналітичних вагах із точністю 0,0001 грама. Перед кожним зважуванням зразки промивали в дистильованій воді від продуктів їх корозії та сушили за нормальної температури впродовж 2 годин.

Випробування проводили у клімат-камері за відносної вологості повітря $Vл = (93 \pm 3) \%$ і температури $(40 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$, у 3 % розчині NaCl, що імітує склад морської води, та прісній воді з температурою 20...22 °C.

Як показники перебігу корозії [9] в роботі прийнято величини та характер змін маси на 1 м² поверхні досліджуваних зразків бронзи впродовж 90 діб їх перебування в певному середовищі, які розраховували за формулою, г/м²:

$$\Delta m_K = 10^6 \cdot \frac{m_i - m_0}{S}, \quad (2)$$



Слід зазначити, що відповідно до ходу залежностей на рисунку 2, а на поверхнях зразків із бронзи БрА5 та БрО3А3 утворюється щільний захисний шар оксиду, вірогідно з Al₂O₃, який вже з 75-ї доби викликає уповільнення корозії на поверхні зразків.

де m_0 , m_i – середнє значення вихідної та кінцевої (через «i» діб перебування зразків у відповідному середовищі) маси зразків, г; S – площа поверхні зразків, мм².

Зразки оцінювали за результатами оптичного виду їх зовнішнього вигляду та за результатами металографічного аналізу їх корозійних пошкоджень із застосуванням у дослідженнях світлового мікроскопа НЕОРНОТ-21.

Результати досліджень. Залежності характеру зміни маси на 1 м² поверхні досліджуваних зразків (Δm_K) від часу їх витримки в різних середовищах показано на рисунку 2.

З аналізу ходу залежностей випливає, що з-поміж випробуваних бронз найбільшу корозійну стійкість у клімат-гідрокамері камері має бронза марки БрА5. При цьому за зміною маси зразків від корозії випробувані бронзи можна розмістити в такий ряд: БрА5 → $\frac{\text{БрО3А3}}{\text{Бр05Ц5С5}}$ → БрА9Ж3Л.

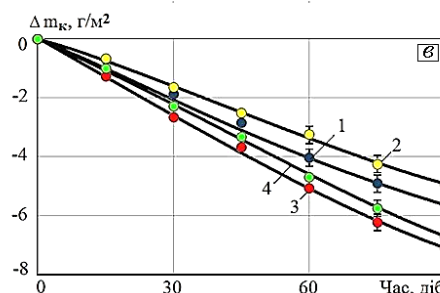


Рис. 2. Залежності Δm_K зразків від часу їх витримки у клімат-гідрокамері (а), у прісній воді (б), у морській воді (в): 1 – БрО3А3, 2 – БрА5, 3 – БрА9Ж3Л, 4 – Бр05Ц5С5

Найбільшу корозійну стійкість у прісній воді має бронза марки БрА5, а за зміною маси зразків від корозії випробувані бронзи можна розмістити в такий ряд: БрА5 → $\frac{\text{БрО3А3}}{\text{Бр05Ц5С5}}$ → БрА9Ж3Л.

Як і в попередньому випадку (див. рис. 2, б) на поверхнях зразків із бронзи

БрА5 та БрО3А3 вірогідно утворюється щільний захисний шар оксиду алюмінію, який вже з 75-ї доби починає уповільнення корозії на поверхні зразків. Водночас, невисокий рівень зміни маси зразків із бронзи БрО5Ц5С5 за час їх випробування дозволяє віднести цю бронзу до відносно стійкої у прісній воді.

Найбільшу корозійну стійкість у морській воді (див. рис. 2, в) має бронза марки БрА5, найменшу – бронза марки БрА9Ж3Л. Тобто за зміною маси зразків від корозії, випробувані бронзи можна розмістити в такий ряд: БрА5 → БрО3А3 → БрО5Ц5С5 → БрА9Ж3Л.

Слід зазначити, що від'ємний характер зміни мас всіх зразків бронз у морській воді пояснюється здатністю продуктів корозії розчинятися у цьому хімічно активному середовищі. Тобто, виходячи з того, що всі продукти корозії в морській воді є хлоридами компонентів, які входять до складу бронз, вони розчиняються у воді. Цим зумовлюється те, що процес корозії зразків усіх бронз у такому середовищі відбувається виключно зі зниженням їх маси.

Мікροструктурний аналіз закономірності формування осередків корозійних уражень бронз БрА9Ж3Л, БрА5, БрО5Ц5С5, БрО3А3 свідчить, що у бронзі БрО3А3 корозійні осередки виникають через міжкристалітну взаємодію на двофазній межі α -Cu ↔ β -Cu₅Sn у поверхневій зоні, де і локалізуються без активного просування від поверхні в глибину (рис. 3, а). На відміну від бронзи БрО3А3, у бронзі БрО5Ц5С5 корозійні пошкодження проникають із поверхні в глибину зразків по ділянках міжкристалітної взаємодії евтектоїдних фазових складових Cu + Cu₃₁Sn₈ (рис. 3, б).

Характер ураження бронзи БрА9Ж3Л (рис. 3, в) пов'язаний з шаруватим механізмом руйнування поверхні взаємодії за залізовмісною сполукою (Fe₃Al). У бронзі БрА5 характер корозійного руйнування є приповерхневий, нерівномірний із вибірковою взаємодією по межах зерен (рис. 3, г). При цьому активність корозійних процесів зростає із посиленням агресивності умов випробувань: прісна вода → клімат-камера → морська вода.

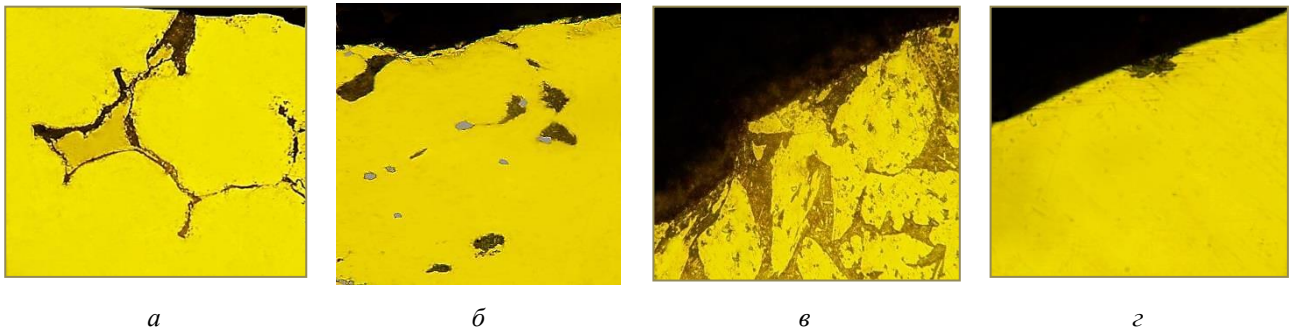


Рис. 3. Мікροструктура поверхні зразків бронз БрО3А3 (а, $\times 1000$), БрО5Ц5С5 (б, $\times 1000$), БрА9Ж3Л (в, $\times 650$) і БрА5 (г, $\times 1000$) після корозійних випробувань у морській воді

Отже, за результатами випробувань установлено, що найнижчу корозійну стійкість у будь-якому реакційному середовищі має ливарна бронза БрА9Ж3Л (див. рис. 2). Пов'язано це з шаруватим механізмом руйнування поверхні взаємодії за залізовмісною сполукою.

З викладеного випливає, що бронза БрО3А3 із числа досліджених ливарних бронз (бронза БрА5 не є ливарною) характеризується найкращим рівнем антикорозійних властивостей і може бути

рекомендована для виготовлення литих деталей, що експлуатуються на повітрі, у водопровідній або морській воді.

Висновки

1. Установлено, що з числа досліджених ливарних бронз БрО3А3 характеризується найкращим рівнем антикорозійних властивостей і може бути рекомендована для виготовлення литих деталей, які експлуатуються на повітрі, у водопровідній або морській воді.

2. Високий рівень антикорозійних властивостей бронзи BrO_3A_3 зумовлений тим, що корозійні осередки виникають через міжкристалітну взаємодію на двофазній границі $\alpha - Cu \leftrightarrow \beta - Cu_5Sn$ у поверхневій зоні, де і локалізуються без активного просування від поверхні в глибину. На відміну від бронзи BrO_3A_3 , у $BrO_5Ц5C_5$ корозійні пошкодження розвиваються з поверхні в глибину зразків по ділянках міжкристалітної

взаємодії евтектоїдних фазових складових $Cu + Cu_{31}Sn_8$. Характер ураження бронзи $BrA_9Ж_3Л$ пов'язаний із шаруватим механізмом руйнування поверхні взаємодії за залізовмісною сполукою (Fe_3Al).

3. Активність корозійних процесів зростає з посиленням агресивності умов випробувань: водопровідна вода \rightarrow клімат-камера \rightarrow морська вода.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Habraken L., Rogister C., Davin A., Contsouradis D. *Metall.* 1969. Bd 23, N 11. Pp. 1148–1156.
2. Soares D. F., Abreu M., Barros D., Castro F. Experimental study of the Cu–Al–Sn phase equilibria, close to the copper zone. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy.* 2017. № 53 (3). Pp. 209–213.
3. Кімстач Т. В., Узлов К. І., Реп'ях С. І., Солоненко Л. І. Аналіз впливу різних середовищ на корозійну стійкість мідних сплавів. *Металознавство та термічна обробка металів.* 2021. № 3 (94). С. 36–45.
4. Стоєв П. І., Литовченко С. В., Гірка І. О., Грицина В. Т. Хімічна корозія та захист металів : навч. посіб. Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2019. 216 с.
5. Грешта В. Л., Лисиця О. В., Степанова Л. П. Кольорові метали та сплави на їх основі : навч. посіб. Запоріжжя : ЗНТУ, 2014. 286 с.
6. Смирязин А. П., Смирязина Н. А., Белова А. В. Промышленные цветные металлы и сплавы. Москва : Металлургия, 1974. 488 с.
7. Кімстач Т. В., Узлов К. І., Усенко Р. В., Солоненко Л. І. Корозійна стійкість бронзових виробів. *Стратегія якості в промисловості і освіті : матер. XVI Міжнар. конф. (м. Варна, Болгарія, 02–05 червня 2021 р.)*. Варна : ТУ–Варна, 2021. С. 78–83.
8. Арзамасов Б. Н., Брострем В. А., Буше Н. А. и др. Конструкционные материалы : справ. под общ. ред. Б. Н. Арзамасова. Москва : Машиностроение, 1990. 688 с.
9. Узлов К. І., Реп'ях С. І., Кімстач Т. В., Сафронова О. А., Мазорчук В. Ф., Білий А. П. Триботехнічні властивості сплаву BrO_3A_3 в умовах сухого тертя. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії.* 2023. Вип. 37. С. 505–521.

REFERENCES

1. Habraken L., Rogister C., Davin A. and Contsouradis D. *Metall.* 1969, Bd 23, N 11, pp. 1148–1156.
2. Soares D.F., Abreu M., Barros D. and Castro F. Experimental study of the Cu–Al–Sn phase equilibria, close to the copper zone. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy.* 2017, no. 53 (3), pp. 209–213.
3. Kimstach T.V., Uzlov K.I., Repiakh S.I. and Solonenko L.I. *Analiz vplyvu riznykh seredovyshch na koroziiu stikiist midnykh splaviv* [Analysis of the influence of different environments on the corrosion resistance of copper alloys] *Metaloznnavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2021, no. 3 (94), pp. 36–45. (in Ukrainian).
4. Stoiev P.I., Lytovchenko S.V., Hirka I.O. and Hrytsyna V.T. *Khimichna koroziiia ta zakhyst metaliv : navchalnyi posibnyk* [Chemical corrosion and protection of metals : study guide]. Kharkiv : KhNU named V.N. Karazina Publ., 2019, 216 p. (in Ukrainian).
5. Hreshhta V.L., Lysytsia O.V. and Stepanova L.P. *Kolorovi metaly ta splavy na yikh osnovi : navchalnyi posibnyk* [Non-ferrous metals and alloys based on them : study guide]. Zaporizhzhia : ZNTU Publ., 2014, 286 p. (in Ukrainian).
6. Smyriahyn A.P., Smyriahyna N.A. and Belova A.V. *Promyshlennye tsvetnye metally y splavy* [Industrial non-ferrous metals and alloys]. Moscow : Metallurhyia Publ., 1974, 488 p. (in Russian).
7. Kimstach T.V., Uzlov K.I., Usenko R.V. and Solonenko L.I. *Koroziiina stikiist bronzovykh vyrobiv* [Corrosion resistance of bronze products]. *Stratehiia yakosti v promyslovosti i osviti : materialy XVI Mizhnarodnoi konferentsii* [Quality strategy in industry and education : materials zha epu XVI Intern. conf.]. (Varna, Bolharia, 02–05 June 2021), TU–Varna, 2021, pp. 78–83. (in Ukrainian).
8. Arzamasov B.N., Brostrem V.A., Bushe N.A. and oth. *Konstrukcionnye materialy : spravochnik* [Structural materials : reference book]. Edited by B.N. Arzamasov, Moscow : Mechanical Engineering Publ., 1990, 688 p. (in Russian).
9. Uzlov K.I., Repiakh S.I., Kimstach T.V., Safronova O.A., Mazorchuk V.F. and Bilyi A.P. *Trybotekhnichni vlastyivosti splavu BrO_3A_3 v umovakh sukhoho tertia* [Tribotechnical properties of BrO_3A_3 alloy under dry friction conditions]. *Fundamentalni ta prykladni problemy chornoj metalurhii* [Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy]. 2023, no. 37, pp. 505–521. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції 16.04.2024.