

Т. В. Кімстач^{1,*} к.т.н., доцент, ORCID 0000-0002-8993-201XС. І. Реп'ях¹, д.т.н., професор, ORCID 0000-0003-0203-4135¹ *Український державний університет науки і технологій** *Автор для листування: t.v.kimstach@ust.edu.ua*

КОРОЗИЯ БРОНЗ У ВОЛОГОМУ ПОВІТРІ ТА СОЛЯНОМУ ТУМАНІ

Анотація. *Вступ.* Корозія – це широко поширена проблема, яка найбільш гостро стоїть для металевих виробів. Наслідками корозії можуть бути соціальні та екологічні проблеми, аварії і катастрофи техногенного походження тощо. Одним з напрямків вирішення цієї проблеми є використання для виготовлення литих виробів конструкційної бронзи, що стійка, зокрема, в природних газових середовищах. *Проблематика.* Перспективною бронзою з цього питання є нова конструкційна немагнітна бронза БрА7К2О1,5Мц0,3 корозійна стійкість якої на сьогодні не досліджена. *Мета.* Визначити кінетику та швидкість непов'язаної корозії у вологому повітрі та соляному тумані при 40 °С бронз марок БрА10Ж4Н4, БрА9ЖЗЛ, БрО6Ц6С3, а також бронзи марки БрА7К2О1,5Мц0,3 до та після її термічної обробки. *Матеріали та методи.* В роботі використовували литі зразки Ø40×10 мм з бронз БрА10Ж4Н4, БрА9ЖЗЛ, БрО6Ц6С3, а також бронзи БрА7К2О1,5Мц0,3 до та після її термічної обробки. Кінетику корозії визначали шляхом вимірювання зміни мас зразків впродовж 28 діб. Масу зразків вимірювали на аналітичних вагах. Швидкість корозії розраховували з урахування щільності бронз у зразках, яку визначали за результатами їх гідростатичного зважування у воді. *Результати.* У вологому повітрі при 40 °С (за прийнятою методикою досліджень) всі використані в даній роботі бронзи є абсолютно стійкими. В соляному тумані при 40 °С з числа досліджених бронз, за десятибальною шкалою оцінювання корозійної стійкості, бронза БрА10Ж4Н4 має 1-й бал стійкості, бронза БрА7К2О1,5Мц0,3 – 1...2-й бал стійкості, бронза БрО6Ц6С3 – 4-й бал стійкості, бронза БрА9ЖЗЛ – 5-й бал стійкості. Характерною рисою для кінетики корозії всіх бронз у вологому повітрі та окремих бронз в соляному тумані (крім бронз марок БрА9ЖЗЛ та БрО6Ц6С3) є пасивація їх поверхні через певний час знаходження у прийнятих в дослідженнях умовах та середовищах. *Висновки.* Отримані дані дають змогу визначити можливість та доцільність використання виробів з литої немагнітної стійкої до корозії бронзи БрА7К2О1,5Мц0,3 замість алюмінієвих магнітних та немагнітних олов'яних бронз. Використання литих деталей з такої бронзи дозволить розширити технічні та експлуатаційні можливості, підвищити

© Т. В. Кімстач, С. І. Реп'ях, 2026



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

надійність та довговічність використання існуючої або нової техніки, приладів тощо.

Ключові слова: бронза, вологе повітря, соляний туман, корозія, кінетика, швидкість корозії, литі вироби.

Посилання для цитування: Кімстач Т. В., Реп'ях С. І. Корозія бронз у вологому повітрі та соляному тумані. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2026. Вип. 40. С. 195-212. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2026-40-012>

Постановка проблеми

Корозія – небажаний і неминучий процес руйнування більшості металевих виробів (деталей, конструкцій тощо), які безпосередньо контактують з природними або техногенними середовищами. Процес корозії починає свій розвиток з поверхонь виробів і може поширюватися вглиб матеріалу. Як результат, з часом свого розвитку це явище стає причиною значної економічної шкоди та втрат. Зокрема, за даними [1] збитки від корозії світової економіки щорічно складають приблизно 2500 мільярдів доларів Сполучених Штатів Америки, що еквівалентно, приблизно, 3% світового внутрішньо валового продукту.

В числі найбільш небезпечних, з точки зору корозійного руйнування, деталі, конструкції та інші металеві вироби, які безпосередньо контактують з морською водою, соляним туманом (морська авіація, плавзасоби, припортові споруди, установки для опріснення морської води, насоси, фітинги, тощо) або з комбінованими середовищами (металеві вироби в нафтовій, хімічній та інших промислових галузях). Результат такого впливу – зниження конструкційної міцності, надійності, довговічності, ремонтпридатності та працездатності металевих виробів, що часто буває пов'язане з появою загрози безпеці як для життя людей, так і для навколишнього середовища [2-4].

Атмосферна корозія – найпоширеніший тип корозії металевих виробів які експлуатують в атмосферних умовах і поділяють на суху континентальну, морську чисту, морську індустріальну, індустріальну, індустріальну підвищеної забрудненості. Крім цього, оскільки основним чинником, що визначає механізм і швидкість атмосферної корозії, є не тільки ступінь забруднення поверхні металу, але і ступінь зволоження, то атмосферну корозію за ступенем зволоженості поверхні розділяють на суху, вологу і мокру.

З точки зору швидкості корозійного руйнування мокра атмосферна корозія, яка відбувається при відносній вологості повітря близько 100%, є найбільш агресивним типом. При товщині плівки води до 0,1 мкм (волога) і понад 10 мкм (мокра) корозія проходить за електрохімічним

механізмом з кисневою деполяризацією. Мінімальну швидкість корозійного руйнування металеві вироби мають при сухій атмосферній корозії, яка проходить за механізмом хімічної корозії. Зі збільшенням товщини плівки води (вологи) на поверхні металевих виробів відбувається перехід механізму корозії від хімічного до електрохімічного. У зв'язку з цим зростає і швидкість корозії [5].

Корозійні процеси характеризуються великою різноманітністю умов та середовищ протікання. Зокрема, за типом агресивних середовищ, корозію поділяють на газову (при низькій та високій температурі), атмосферну, в неелектролітах (в дистильованій воді, розплаві сірки, рідкому паливі тощо), в електролітах (вода сольова, кислотна, лужна, морська, прісна і т.д.), підземну (в ґрунтах), мікробіологічну (в продуктах життєдіяльності бактерій, плісняви, грибків), електрокорозію, під дією блукаючих струмів, тощо.

При цьому за умовами протікання корозійного процесу розрізняють корозію контактну, щільну, при неповному та повному зануренні в середовище, пов'язану і непов'язану, в стоячому та рухливому середовищі, при терті, міжкристалічну, під напругою тощо. За характером руйнування корозію поділяють на суцільну, рівномірну, нерівномірну, вибірккову, локальну, водневу (корозійну крихкість), а також таку, яка охоплює окремі ділянки (плямами, виразкова, точкова, наскрізна, міжкристалічна). В зв'язку з такою величезною різноманітністю умов проходження корозії, на сьогодні, корозійні процеси однозначно класифікують лише за механізмом протікання, розділяючи їх хімічні та електрохімічні [6].

Корозія більшості металів та сплавів промислового призначення не проходить у сухому повітрі, тобто, при відносній вологості повітря менше 45% [7]. При більшій відносній вологості водяна пара з повітря конденсується на будь-якій більш холодній поверхні, що створює умови для проходження електрохімічних реакцій на поверхні металевих виробів і, відповідно, їх корозії. При цьому, швидкість корозії різко прискорюють розчинні у воді (конденсаті) гази (кисень, аміак, сірководень і т.п.), аерозолі, солі, пил тощо [8, 9]. Джерелом забруднювачів природного конденсату може бути, наприклад, сіль, яка потрапляє в повітря з сумішей, що використовують для зледеніння автомобільних доріг, з соляного туману у прилеглих до моря районах, з ґрунтових солончаків, гірських порід, виробничих викидів, мінеральних добрив тощо [10-13].

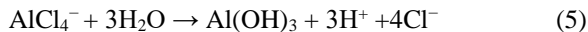
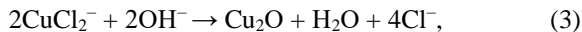
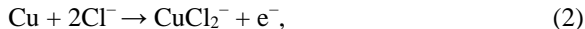
Таким чином, корозія є актуальною технічною та економічною проблемою сучасності, вирішення якої забезпечить надійність та продовження терміну служби металевих виробів і тим самим призведе до мінімізації ризику виникнення екологічних проблем і можливих

катастроф, а її вирішення, зокрема, знаходиться в площині розробки нових конструкційних сплавів стійких до корозії в природних середовищах.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Висока корозійна стійкість алюмінієвої бронзи у вологому повітрі обумовлена існуванням на її поверхні щільної, суцільної та міцно прилеглої до неї плівки з оксидів алюмінію яка на виробках з алюмінієвої бронзи існує ще до їх контакту з вологою. За наявності в хімічному складі бронзи кремнію, титану, хрому тощо. до складу вихідної захисної плівки можуть входити оксиди цих та подібних хімічних елементів.

У разі контакту виробів з алюмінієвої бронзи з соляним туманом захисна плівка на їх поверхні складається як з оксидів алюмінію, так і оксидів міді. При цьому, частина плівки з оксидів міді формується за анодна реакцією реакцією де анодна реакція являє собою окислення міді, а катодна реакція – відновлення кисню. За даними [14-16] захисна плівка на алюмінієвій бронзі також може складатися з оксиду міді (I) та гідроксиду алюмінію, які утворюються на поверхні бронзових виробів відповідно до наступних хімічних реакцій:

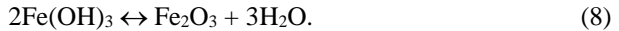


Ефект уповільнення швидкості корозії алюмінієвих бронз у соляному тумані та морській воді пояснюється формуванням на їх поверхні суцільної пасивної плівки оксидів [15, 17, 18]. На думку авторів роботи [19], така плівка може мати два шари – зовнішній з оксиду міді та внутрішній з оксиду алюмінію.

За даними [20], корозійні процеси алюмінієвої бронзи під тонкими шарами електроліту (водний розчин NaCl) істотно відрізняються від подібних процесів, що проходять у великій масі електроліту (морській воді). Встановлено, що швидкість корозії алюмінієвої бронзи збільшується зі зниженням товщини шару електроліту на ранній стадії корозії та визначається швидкістю дифузії кисню через шар електроліту. З накопиченням продуктів корозії на поверхні бронзи змінюється і швидкість її корозії. При цьому, захисна плівка на поверхні бронзи набуває багат шарової структури, що складається з продуктів корозії, серед яких перший шар (шар, що контактує безпосередньо в поверхнею бронзи) складається з Al_2O_3 , другий шар – із суміші Cu_2O і

CuCl, третій шар (зовнішній шар) – із суміші хімічних сполук серед яких Cu(OH)Cl₃, Cu₂(OH)₂CO₃, Cu₄(OH)₆SO₄, Al₄SO₄(OH)₁₀·4H₂O, Al₂(OH)₅Cl.

Як і у інших сплавів, корозійна стійкість алюмінієвої бронзи багато в чому залежить від її хімічного та фазового складу, оскільки в багатокомпонентних алюмінієвих бронзах в складі захисного шару можуть бути присутніми оксиди та гідроксиди і інших компонентів бронз, зокрема, оксиди кремнію, нікелю, заліза, олова, тощо, які певним чином впливають на фізико-хімічні властивості захисної плівки і, відповідно, на тип та швидкість корозії бронзи. Зокрема, в вологому повітрі за наявності контакту міді із залізистою або залізівмісною фазою в бронзі виникає гальванічна пара, де менш хімічно активна мідь виступає в ролі катода, а залізо – анода. З появою такої гальванічної пари проходять анодно-катодні процеси, які завершуються виникненням нових хімічних сполук відповідно до наступних хімічних реакцій:



Згодом, гідроксид заліза (II) окислюється киснем повітря, перетворюючись на іржу ($m\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{FeO} \cdot p\text{H}_2\text{O}$) в місцях виходу залізистої фази на поверхню бронзи.

На поверхні виробів із олов'яної бронзи при контакті з атмосферним повітрям формується щільна плівка діоксиду олова. У міру збільшення вмісту олова в бронзі та тривалості знаходження виробу на повітрі плівка діоксиду олова стає все щільнішою та товстішою. З часом, це приводить до зменшення швидкості корозії олов'яної бронзи, тобто, до підвищення її корозійної стійкості.

Незважаючи на нескінчену можливість відновлення захисної плівки після механічних ушкоджень поверхні бронзових виробів цієї здатності не завжди виявляється достатнім для збереження бронзовими виробами високої стійкості до корозії. У таких випадках поверхні бронзових виробів оксидують, фосфатують, воронять, вкривають лакофарбами, еластичною пластмасою, смолою, гумою, емаллю тощо, обробляють інгібіторами, використовують вакуумне напилення, лазерну обробку поверхні тощо [21-23].

Незважаючи на різновиди та поширеність таких способів захисту від корозії відходи використання таких покриттів є також певною екологічною небезпекою. Зокрема, у лакофарбових покриттів біологічно небезпечними є їх розчинники органічного походження, у гальванічних покриттів – стічні води, які містять біологічно активні

аніони та важкі метали, залишки ціаністих солей або комплексоутворювачів при використанні неціаністих електролітів [24]. Крім цього, захист цими способами припустимий не для всіх умов використання металевих виробів, що вимагає розробки нових стійких до корозії в різних середовищах сплавів з необхідним рівнем преференційних експлуатаційних та споживчих властивостей.

Мета дослідження

Визначити кінетику та швидкість непов'язаної корозії у вологому повітрі та соляному тумані при 40 °С бронз марок БрА10Ж4Н4, БрА9Ж3Л, БрО6Ц6С3, а також бронзи марки БрА7К2О1,5Мц0,3 до та після її термічної обробки (т/о).

Матеріали, обладнання, методи та методики досліджень

Плавку бронз проводили в індукційній печі з графітовим тиглем. В якості шихтових матеріалів використовували наважки міді катодної марки М2 (ДСТУ 3211-2009), алюмінію марки А199,7 (ДСТУ ISO 209-1:2002), кремнію марки Кр1 (ДСТУ 2963-94), олова марки О1 (ДСТУ EN 610:2004); марганцю металевого марки Мн95 і силікомарганцю МнС17 ДСТУ (16591.4:2009).

Плавки проводили під шаром деревного вугілля. Після розплавлення наважок шихти температуру розплаву в тиглі підвищували до 1210±10 °С, розкислювали марганцем або силікомарганцем, видаляли з дзеркала розплаву залишки деревного вугілля і заливали у піщану (94% кварцового піску і 6% рідкого скла, за масою) ливарну форму. Виливки циліндричної форми Ø50×190 мм після заливки витримували в ливарних формах до вибивання впродовж 24 годин. Після охолодження з виливків вирізали зразки у вигляді шайб Ø40×(8...10) мм для визначення щільності бронз, проведення їх хімічного аналізу і іспитів на корозійну стійкість. Хімічний склад бронз визначали на аналізаторі EXPERT 4L, масу зразків визначали зважуванням на електронних вагах з точністю 0,01 г, розміри зразків вимірювали штангенциркулем з точністю 0,01 мм.

Щільність зразків визначали гідростатичним методом. Для цього зважували зразки на повітрі та в дистильованій воді при 20 °С. За результатами зважування проводили розрахунки щільності бронз за формулою, г/см³:

$$\rho = m_{\text{п}} \cdot (m_{\text{п}} - m_{\text{в}})^{-1}, \quad (9)$$

де $m_{\text{п}}$, $m_{\text{в}}$ – маса зразка на повітрі і в дистильованій воді відповідно, г.

Термічну обробку зразків бронзи БрА7К2О1,5МЦ0,3 проводили за наступним режимом:

- нагрівання з кімнатної температури до 760±10 °С;

- ізотермічна витримка при 760 ± 10 °С впродовж 40 хв;
- загартування у воді з температурою 20 °С при співвідношенні маси зразка до маси води 1/20;
- старіння при 300 ± 5 °С впродовж 70 ± 5 хв з послідовним охолодженням на повітрі.

В більшості випадків досліджень процесів корозійної стійкості відсутня можливість точного дотримання часу впливу таких природних газових середовищ у випробувальній камері з передбачуваним терміном служби металу (сплаву). Тим не менш, проведення прискорених підвищеною температурою випробувань у контрольованому газовому середовищі дозволяють встановити їхню здатність протистояти корозії, що є актуальним завданням необхідного для вибору найбільш відповідного сплаву для роботи в конкретних умовах. При цьому, для характеристики швидкості течії корозії найбільш часто використовують прямі показники - показник зміни маси або глибинний показник.

Показник зміни маси – співвідношення зміни маси зразка сплаву, обумовлене його корозією, до площі поверхні зразка та часу випробувань, $г/(м^2 \cdot рік)$. При цьому, якщо під час іспитів маса зразка зменшується, то для визначення швидкості корозії використовують від'ємний, у разі якщо продукти корозії залишаються на поверхні зразку - використовують додатний масовий показник.

Глибинний показник – співвідношення товщини поверхневого шару зразка, ураженого корозією на час випробувань, $мм/рік$.

На глибинний показник швидкості корозії найчастіше використовують для оцінювання корозійної стійкості металів і сплавів. Зокрема, в США Національна асоціація інженерів-корозіоністів (National Association of Corrosion Engineers (NACE) International) використовує 5 бальну шкалу, яка приведена в табл. 1.

Таблиця 1 – П'ятибальна шкала США для оцінювання корозійної стійкості металів і сплавів

| Група стійкості металів і сплавів | Швидкість корозії, мм/рік | Бал |
|-----------------------------------|---------------------------|-----|
| Дуже стійкі | <0,1 | 1 |
| Стійкі | 0,1 – 1,0 | 2 |
| Зниженої стійкості | 1,1 – 3,0 | 3 |
| Малостійкі | 3,1 – 10,0 | 4 |
| Нестійкі | >10,1 | 5 |

В Україні корозійну стійкість металів і сплавів оцінюють за 10-бальною шкалою, яка приведена в табл. 2.

В даній роботі для визначення кінетики корозії застосовували показник зміни маси зразків за час іспитів, а для визначення швидкості корозії – показник глибинної корозії. При цьому, бал корозійної

стійкості зразків визначали за шкалою табл. 2.

Таблиця 2 – Десятибальна шкала для оцінювання корозійної стійкості металів і сплавів

| Група стійкості металів і сплавів | Швидкість корозії, мм/рік | Бал |
|-----------------------------------|---------------------------|-----|
| Абсолютно стійкі | <0,001 | 1 |
| Дуже стійкі | 0,001-0,005 | 2 |
| | 0,005-0,010 | 3 |
| Стійкі | 0,010-0,050 | 4 |
| | 0,050-0,100 | 5 |
| Знижено стійкі | 0,100-0,500 | 6 |
| | 0,500-1,000 | 7 |
| Малостійкі | 1,0-5,0 | 8 |
| | 5,0-10,0 | 9 |
| Нестійкі | >10,0 | 10 |

Для визначення швидкості корозії зразки дослідних бронз витримували впродовж 28 діб в клімат-камері в середовищі вологого повітря та соляного туману який утворювався з 3,5 % за масою водному розчині NaCl при температурі 40 °С і відносній вологості 90%. Періодичність зважування зразків на аналітичних вагах становила 7 діб.

З метою виключення впливу інкубаційного періоду та початкового періоду нестабільної зміни маси зразків, швидкість корозії в соляному тумані розраховували за даними втрати їх маси в період з 21 до 28 доби іспитів за формулою, мм/рік:

$$W = 365 \cdot (m_{21} - m_{28}) / (S \cdot \rho \cdot \tau), \quad (10)$$

де S - площа поверхні зразка, см², ρ - щільність бронзового зразка, г/см³; τ - контрольний проміжок часу іспитів (τ = 7 діб).

Нерозчинні у воді шари кристалів на поверхні зразків класифікували за кольором, виходячи з наступного:

- оксид міді (II) – кристали чорного кольору (CuO);
- оксид міді (I) – кристали червоного, червоно-коричневого кольору (Cu₂O);
- хлорид міді (II) – кристали блакитно-зелених відтінків (CuCl₂);
- хлорид міді (I) – кристали білого кольору або з зеленуватим відтінком (CuCl);
- оксид олова (II) – кристали чорного-синього або коричнево-чорного кольору (SnO).

Кінетику непов'язаної корозії бронз визначали шляхом вимірювання зміни маси зразків бронз у часі, які знаходились у вологому повітрі при 40 °С при відносній вологості 90% впродовж 28 діб.

Для визначення синергетичного впливу легуючих компонентів

бронзи БрА7К2О1,5Мц0,3 на її корозійну стійкість використали критерій K_R [25]:

$$K_R = (1 - 0,01 \cdot nn) \cdot \frac{Al - Si - Mn}{(1 + Sn)^2}, \quad (11)$$

де nn – масовий вміст небажаних домішок в бронзі, %; Al, Si, Mn, Sn – відповідно, масовий вміст алюмінію, кремнію, марганцю і олова в бронзі, %.

Результати дослідження

Хімічний склад досліджуваних бронз та результати розрахунку величин критерію K_R за формулою (11) для бронзи БрА7К2О1,5Мц0,3 наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Хімічний склад досліджуваних бронз та величини K_R для бронзи БрА7К2О1,5Мц0,3

| Марка бронзи | Масовий вміст хімічних елементів у бронзах, % | | | | | | | K_R |
|-----------------|---|-------|------|-------|------|-------------------------|-------|-------|
| | Cu | Al | Si | Mn | Sn | Інші | nn | |
| БрА10Ж4Н4 | 81,683 | 10,05 | – | – | – | Fe - 3,98, Ni - 3,95 | 0,337 | – |
| БрА9Ж3Л | 87,506 | 9,12 | – | – | – | Fe - 3,07 | 0,304 | – |
| БрО6Ц6С3 | 84,555 | – | – | – | 5,97 | Zn - 6,05, Pb - 3 | 0,425 | – |
| БрА7К2О1,5Мц0,3 | 88,600 | 7,42 | 1,67 | 0,400 | 1,64 | – | 0,270 | 0,77 |
| | 89,500 | 6,40 | 1,62 | 0,382 | 1,76 | – | 0,338 | 0,57 |
| | 88,520 | 6,21 | 2,48 | 0,211 | 2,19 | – | 0,390 | 0,34 |

Результати визначення щільності та площі поверхні зразків надано в табл. 4.

Вигляд зразків бронз після їх витримки у вологому повітрі при 40 °С впродовж 28 діб представлений на рис. 1, а залежності зміни їх маси в часі за період іспитів представлені на рис. 2.

З результатів аналізу зображень на рис. 1 та ходу залежностей на рис. 2 випливає, що всі досліджувані бронзи абсолютно стійкі у вологому повітрі, оскільки за час випробувань, по-перше, жодна бронза практично не змінила свій вихідний колір та відтінок, по-друге, за час випробувань не відбулося зменшення маси жодного зі зразків.

Як випливає з аналізу перебігу залежностей на рис. 2, на всіх зразках за час випробувань спостерігається збільшення їхньої маси. При цьому збільшення маси зразків із бронз БрА10Ж4Н4, БрА9Ж3Л і БрО6Ц6С3 починається практично з моменту початку випробувань. У «сирих» зразків з бронзи БрА7К2О1,5Мц0,3 збільшення маси на порядок менше, ніж у зразків з бронз БрА10Ж4Н4, БрА9Ж3Л і БрО6Ц6С3, а на кінетичній кривій зразків з «сирої» бронзи БрА7К2О1,5Мц0,3 присутній певний інкубаційний період - від 7 до 28 і більше днів (див.

залежності 4...6 на рис. 2). У той же час, у зразків з термічно обробленої бронзи БрА7К2О1,5Мц0,3 інкубаційний період або зовсім відсутній або скорочений до 7 днів, а швидкість підвищення їхньої маси у ~3 рази більша, ніж у зразків із «сирої» бронзи БрА7К2О1,5Мц0,3, що пояснюється відмінністю фазового складу бронз, спричиненої проведеною термічною обробкою, за однакового хімічного складу.

Таблиця 4 – Результати визначення щільності та площі поверхні зразків

| Індекс | Бронза | K_R | Термічна обробка | Щільність, $г/см^3$ | Площа поверхні, $см^2$ |
|--------|-----------------|-------|------------------|---------------------|------------------------|
| а | БрА10Н4Ж4Л | | – | 7,30 | 34,2963 |
| б | БрА9Ж3Л | | – | 7,50 | 37,2915 |
| в | БрО6Ц6С3 | | – | 8,75 | 37,4229 |
| г | БрА7К5О1,5Мц0,5 | 0,34 | – | 7,68 | 37,5544 |
| д | | 0,57 | – | 7,72 | 35,2985 |
| е | | 0,77 | – | 7,70 | 35,1024 |
| ж | | 0,34 | + | 7,68 | 37,1187 |
| з | | 0,57 | + | 7,72 | 34,5211 |
| і | | 0,77 | + | 7,70 | 35,2909 |

Примітка: «–» – без термічної обробки, «+» – термічно оброблені

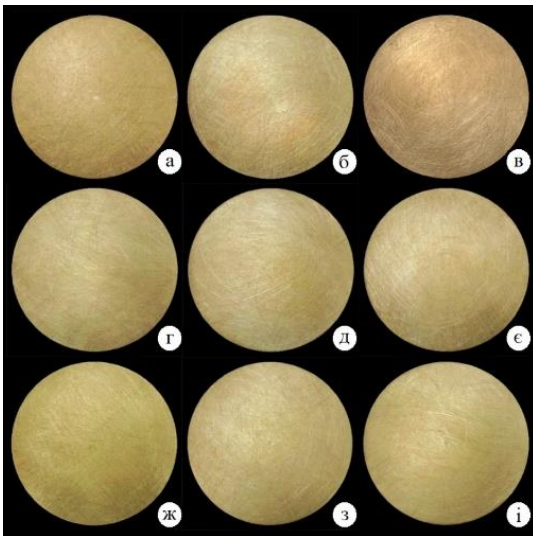


Рисунок 1 – Вигляд зразків бронзи БрА10Ж4Н4 (а), БрА9Ж3Л (б), БрО6Ц6С3 (в), БрА7К2О1,5Мц0,3 ($K_R=0,34$) (г), БрА7К2О1,5Мц0,3 ($K_R=0,57$) (д), БрА7К2О1,5Мц0,3 ($K_R=0,77$) (е), БрА7К2О1,5Мц0,3 ($K_R=0,34$, т/о) (ж), БрА7К2О1,5Мц0,3 ($K_R=0,57$, т/о) (з), БрА7К2О1,5Мц0,3 ($K_R=0,77$, т/о) (і) після їх витримки у вологому повітрі при 40 °С впродовж 28 діб

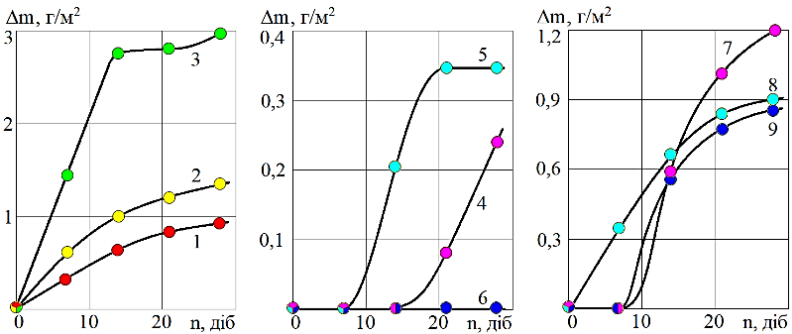


Рисунок 2 – Зміна маси бронз у часі, які знаходились у вологому повітрі при 40 °С: 1 - БрА10Ж4Н4; 2 - БрА9Ж3Л; 3 - БрО6Ц6С3; 4 - БрА7К2О1,5Мц0,3 ($K_R=0,34$); 5 - БрА7К2О1,5Мц0,3 ($K_R=0,57$); 6 - БрА7К2О1,5Мц0,3 ($K_R=0,77$); 7 - БрА7К2О1,5Мц0,3 ($K_R=0,34$, $\tau/0$); 8 - БрА7К2О1,5Мц0,3 ($K_R=0,57$, $\tau/0$); 9 - БрА7К2О1,5Мц0,3 ($K_R=0,77$, $\tau/0$)

Спільним у характері кінетик процесу корозії досліджуваних бронз є уповільнення в часі швидкості приросту маси зразків. Ця закономірність пояснюється тим, що з часом контакту алюмінієвих бронз із вологою атмосферою на їхній поверхні проходить і завершується процес формування суцільної плівки оксидів алюмінію, а на олов'яній бронзі - суцільної плівки оксидів двоокису олова, які для своїх бронз є захисним «бар'єром» від корозійного впливу на них зовнішнього середовища – вологого повітря та його кисню.

Вигляд зразків бронз після їх витримки в соляному тумані повітрі при 40 °С впродовж 28 діб представлений на рис. 3, а залежності зміни їх маси в часі за період іспитів представлені на рис. 4.

З аналізу умов проведення іспитів, зображень на рис. 3 та ходу залежностей на рис. 4 випливає, що за механізмом протікання корозія в соляному тумані має електрохімічну природу і за видом корозійних уражень носить суцільний рівномірний (БрА7К2О1,5Мц0,3), суцільний нерівномірний (БрА10Ж4Н4, БрО6Ц6С3) та суцільний вибірковий (БрА9Ж3Л) характер. При цьому, на відміну від корозії у вологому повітрі, процес корозії у соляному тумані починається для будь яких бронз без інкубаційного періоду, а найбільш вірогідними основними продуктами корозії (виходячи з кольору поверхонь зразків) є оксиди міді.

Спільним у характері кінетик процесу корозії бронз БрА10Ж4Н4 і БрА7К2О1,5Мц0,3 є уповільнення в часі швидкості втрати маси зразків. Вірогідно, що така закономірність зумовлена як зменшенням у часі шорсткості поверхонь досліджуваних зразків, так і завершенням через певний час процесу формування суцільної захисної плівки на їх поверхнях.

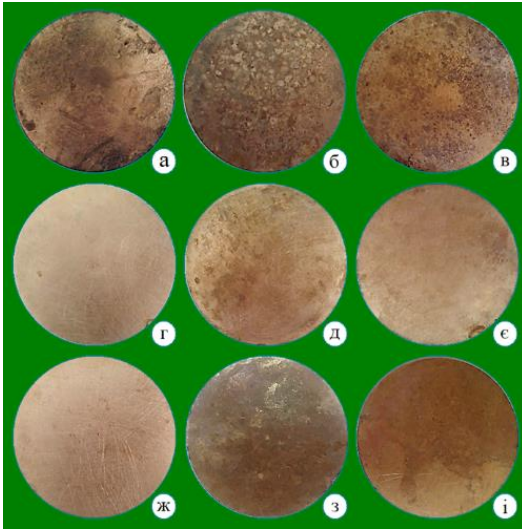


Рисунок 3 – Вигляд зразків бронзи БрА10Ж4Н4 (а), БрА9Ж3Л (б), БрО6Ц6С3 (в), БрА7К2О1,5Мц0,3 ($K_R=0,34$) (г), БрА7К2О1,5Мц0,3 ($K_R=0,57$) (д), БрА7К2О1,5Мц0,3 ($K_R=0,77$) (е), БрА7К2О1,5Мц0,3 ($K_R=0,34$, т/о) (ж), БрА7К2О1,5Мц0,3 ($K_R=0,57$, т/о) (з), БрА7К2О1,5Мц0,3 ($K_R=0,77$, т/о) (і) після їх витримки в соляному тумані при 40 °С впродовж 28 діб

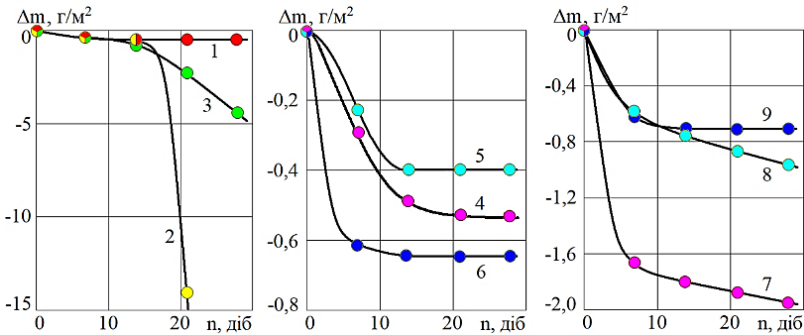


Рисунок 4 – Зміна маси бронз у часі, які знаходились в соляному тумані при 40 °С: 1 - БрА10Ж4Н4; 2 - БрА9Ж3Л; 3 - БрО6Ц6С3; 4 - БрА7К2О1,5Мц0,3 ($K_R=0,34$); 5 - БрА7К2О1,5Мц0,3 ($K_R=0,57$); 6 - БрА7К2О1,5Мц0,3 ($K_R=0,77$); 7 - БрА7К2О1,5Мц0,3 ($K_R=0,34$, т/о); 8 - БрА7К2О1,5Мц0,3 ($K_R=0,57$, т/о); 9 - БрА7К2О1,5Мц0,3 ($K_R=0,77$, т/о)

Гістограма швидкості корозії бронз в соляному тумані при 40 °С представлена на рис. 5, де термічно оброблені зразки бронз позначені як (т/о), а бал корозійної стійкості надано за десятибальною шкалою (див. табл. 2).

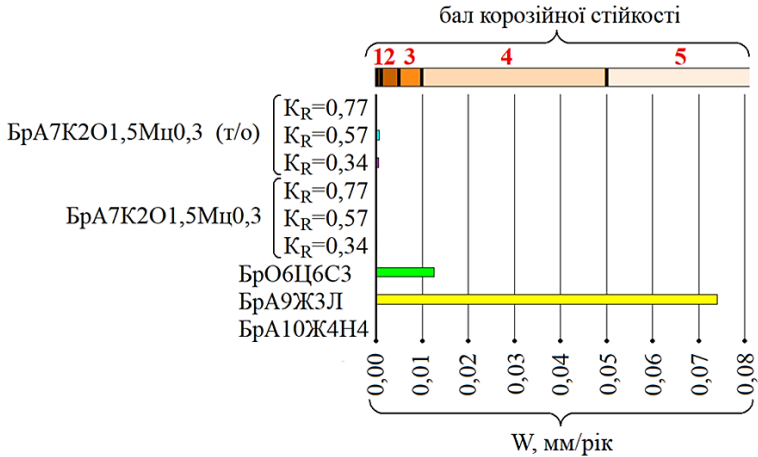


Рисунок 5 – Гістограма швидкості корозії бронз в соляному тумані при 40 °С

З аналізу гістограми на рис. 5 випливає, що за показником швидкості корозії в соляному тумані при 40 °С за десятибальною шкалою бронза БрА10Ж4Н4 та бронзи марки БрА7К2О1,5Мц0,3 в “сирому” стані мають 1-й бал корозійної стійкості, бронзи марки БрА7К2О1,5Мц0,3 в термічно обробленому стані мають 2-й бал корозійної стійкості, бронза БрО6Ц6С3 має 4-й бал корозійної стійкості, а бронза БрА9Ж3Л – 5-й бал корозійної стійкості. Тобто, бронзи марки БрА7К2О1,5Мц0,3 в “сирому” стані можна рекомендувати для виготовлення литих деталей, які працюють в середовищі соляного туману.

Висновки

1. У вологому повітрі всі досліджувані в даній роботі бронзи абсолютно стійкі. Найбільшу стійкість, з числа досліджуваних бронз, мають “сирі” бронзи БрА7К2О1,5Мц0,3 незалежно від змін їх хімічного складу в межах марки.

2. З числа досліджених бронз, за десятибальною шкалою оцінювання корозійної стійкості бронза БрА10Ж4Н4 та бронзи марки БрА7К2О1,5Мц0,3 в “сирому” стані мають 1-й бал корозійної стійкості, бронзи марки БрА7К2О1,5Мц0,3 в термічно обробленому стані мають 2-й бал корозійної стійкості, бронза БрО6Ц6С3 має 4-й бал корозійної стійкості, а бронза БрА9Ж3Л – 5-й бал корозійної стійкості, що є основою рекомендувати використовувати бронзу марки БрА7К2О1,5Мц0,3 в “сирому” стані для виготовлення литих деталей, які працюють в середовищі соляного туману.

3. Характерною рисою кінетики корозії всіх бронз у вологому повітрі та окремих бронз в соляному тумані (крім бронз марок

БрА9ЖЗЛ та БрО6Ц6СЗ) є пасивація їх поверхні через певний час знаходження у використаних в дослідженнях умовах.

4. Синергетичний вплив хімічного складу бронзи БрА7К2О1,5Мц0,3 незалежно від наявності чи відсутності її термічної обробки не встановлено.

Перелік посилань

1. The Global Cost and Impact of Corrosion. *Asset Integrity Intelligence. Inspectioneering*. URL: <https://inspectioneering.com/news/2016-03-08/5202/nace-study-estimates-global-cost-of-corrosion-at-25-trillion-ann>.
2. Disadvantages of Corrosion: Economic, Structural, and More. *CORCON Institute of Corrosion*. URL: https://corrosionindia.org/disadvantages-of-corrosion-economic-structural/?utm_source=chatgpt.com.
3. The influence of the environment and corrosion on the structural integrity of aircraft materials / S. RUSSO et al. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2009. Vol. 32, no. 6. P. 464–472. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2009.01348.x>.
4. Global and economic effects of corrosion - An overview / O. O. Joseph et al. *TECHNOLOGIES AND MATERIALS FOR RENEWABLE ENERGY, ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY: TMREES21Gr*, Athens, Greece. 2022. <https://doi.org/10.1063/5.0092286>.
5. Experimental Investigation and Modeling of Film Flow Corrosion / M. C. Ilie et al. *Metals*. 2023. Vol. 13, no. 8. P. 1425. <https://doi.org/10.3390/met13081425>.
6. Ibrahim B. E., Nardeli J., Guo L. An Overview of Corrosion. *Sustainable Corrosion Inhibitors I: Fundamentals, Methodologies, and Industrial Applications*. 2021. Vol. 1403. P. 1 – 19. URL: https://www.researchgate.net/publication/356295146_An_Overview_of_Corrosion.
7. Atmospheric corrosion prediction: a review / Y. Cai et al. *Corrosion Reviews*. 2020. Vol. 38, no. 4. P. 299–321. <https://doi.org/10.1515/corrrev-2019-0100>.
8. Influence of Air Pollution Factors on Corrosion of Metal Equipment in Transmission and Transformation Power Stations / X. Chen et al. *Atmosphere*. 2022. Vol. 13, no. 7. P. 1041. <https://doi.org/10.3390/atmos13071041>.
9. Francis R. Humidity and Dew Point: Their Effect on Corrosion and Coatings. *Academia.edu - Find Research Papers, Topics, Researchers*. URL: https://www.academia.edu/17021842/Humidity_and_Dew_Point_Their_Effect_on_Corrosion_and_Coatings.
10. Influence of the Environment on the Atmospheric Corrosion of Bronze / R. Picciochi et al. *Journal of Applied Electrochemistry*. 2004. Vol. 34, no. 10. P. 989–995. <https://doi.org/10.1023/b:jach.0000042667.84920.e2>.
11. The role of Sn on the long-term atmospheric corrosion of binary Cu-Sn bronze alloys in architecture / T. Chang et al. *Corrosion Science*. 2019. Vol. 149. P. 54–67. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.01.002>.
12. 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.

<https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.010721.36.780>.

13. Кімстач Т. В., Узлов К. І., Усенко Р. В., Солоненко Л. І. Корозійна стійкість бронзових виробів. *Стратегія якості в промисловості і освіті: матеріали. XVI Міжнародної конференції, (02–05 червня 2021 р. м. Варна, Болгарія)*. Варна: ТУ–Варна, 2021. С. 78–83. URL: <https://nmetau.edu.ua/file/--sbornik-varna-2021-full.pdf>.

14. Schüssler A., Exner H. E. The corrosion of nickel-aluminium bronzes in seawater–II. The corrosion mechanism in the presence of sulphide pollution. *Corrosion Science*. 1993. Vol. 34, no. 11. P. 1803–1815. [https://doi.org/10.1016/0010-938x\(93\)90018-c](https://doi.org/10.1016/0010-938x(93)90018-c).

15. Wharton J. A., Stokes K. R. The influence of nickel–aluminium bronze microstructure and crevice solution on the initiation of crevice corrosion. *Electrochimica Acta*. 2008. Vol. 53, no. 5. P. 2463–2473. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2007.10.047>.

16. Flow influenced electrochemical corrosion of nickel aluminium bronze. Part I. Cathodic polarisation / G. Kear et al. *Journal of Applied Electrochemistry*. 2004. Vol. 34, no. 12. P. 1235–1240. <https://doi.org/10.1007/s10800-004-1758-1>.

17. The corrosion of nickel–aluminium bronze in seawater / J. A. Wharton et al. *Corrosion Science*. 2005. Vol. 47, no. 12. P. 3336–3367. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.05.053>.

18. Kear G., Barker B. D., Walsh F. C. Electrochemical corrosion of unalloyed copper in chloride media – a critical review. *Corrosion Science*. 2004. Vol. 46, no. 1. P. 109–135. [https://doi.org/10.1016/s0010-938x\(02\)00257-3](https://doi.org/10.1016/s0010-938x(02)00257-3).

19. Ferrara R. J., Caton T. E. Review of dealloying of cast aluminum bronze and nickel-aluminum bronze alloys in sea water service. *Materials Performance*. 1982. Vol. 21, no. 2. P. 30–34.

20. Corrosion Behavior of Aluminum Bronze under Thin Electrolyte Layers Containing Artificial Seawater / Y. Chen et al. *International Journal of Electrochemical Science*. 2015. Vol. 10, no. 11. P. 9056–9072. [https://doi.org/10.1016/s1452-3981\(23\)11160-6](https://doi.org/10.1016/s1452-3981(23)11160-6).

21. Shanghai Jiao Tong University Press. *Materials Corrosion and Protection* / ed. By Y. Huang, J. Zhang. De Gruyter, 2018. <https://doi.org/10.1515/9783110310054>.

22. Traditional and innovative protective coatings for outdoor bronze: Application and performance comparison / B. Salvadori et al. *Journal of Applied Polymer Science*. 2017. Vol. 135, no. 12. P. 46011. <https://doi.org/10.1002/app.46011>.

23. Multifunctional organic-inorganic hybrid coating for enhanced bronze corrosion protection / W. Wu et al. *Journal of Cultural Heritage*. 2024. Vol. 69. P. 113–125. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.08.003>.

24. Kumar V., Dwivedi S. K. Toxicity potential of electroplating wastewater and its bioremediation approaches: a review. *Environmental Technology Reviews*. 2021. Vol. 10, no. 1. P. 238–254. <https://doi.org/10.1080/21622515.2021.1983030>.

25. Kimstach T. V., Uzlov K. I. Chemical composition influence on mechanical properties of Cu–Al–Si–Sn–Mn system bronze during its solidification in die mold. *System technologies*. 2025. Vol. 2, no. 157. P. 135–145. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-2-157-2025-14>.

References

1. The Global Cost and Impact of Corrosion. *Asset Integrity Intelligence / Inspectioneering*. URL: <https://inspectioneering.com/news/2016-03-08/5202/nace-study-estimates-global-cost-of-corrosion-at-25-trillion-ann>
2. Disadvantages of Corrosion: Economic, Structural, and More. *CORCON Institute of Corrosion*. URL: https://corrosionindia.org/disadvantages-of-corrosion-economic-structural/?utm_source=chatgpt.com
3. Russo, S., Sharp, P. K., Dhamari, R., Mills, T. B., Hinton, B. R. W., Clark, G., & Shankar, K. (2009). The influence of the environment and corrosion on the structural integrity of aircraft materials. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 32(6), 464–472. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2009.01348.x>.
4. Joseph, O. O., Banjo, S., Afolalu, S. A., & Babaremu, K. O. (2022). Global and economic effects of corrosion - An overview. *Technologies and materials for renewable energy, environment and sustainability: TMREES21Gr*. AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/5.0092286>.
5. Ilie, M. C., Maior, I., Raducanu, C. E., Deleanu, I. M., Dobre, T., & Parvulescu, O. C. (2023). Experimental Investigation and Modeling of Film Flow Corrosion. *Metals*, 13(8), 1425. <https://doi.org/10.3390/met13081425>.
6. Ibrahim B. E., Nardeli J., Guo L. (2021) An Overview of Corrosion. *Sustainable Corrosion Inhibitors I: Fundamentals, Methodologies, and Industrial Applications*. 1403, 1 – 19. URL: https://www.researchgate.net/publication/356295146_An_Overview_of_Corrosion.
7. Cai, Y., Xu, Y., Zhao, Y., & Ma, X. (2020). Atmospheric corrosion prediction: a review. *Corrosion Reviews*, 38(4), 299–321. <https://doi.org/10.1515/corrrev-2019-0100>.
8. Chen, X., Zhang, Z., Zhang, H., Yan, H., Liu, F., & Tu, S. (2022). Influence of Air Pollution Factors on Corrosion of Metal Equipment in Transmission and Transformation Power Stations. *Atmosphere*, 13(7), 1041. <https://doi.org/10.3390/atmos13071041>.
9. Francis, R. (2002). *Humidity and Dew Point: Their Effect on Corrosion and Coatings*. Academia.edu – Find Research Papers, Topics Researchers. https://www.academia.edu/17021842/Humidity_and_Dew_Point_Their_Effect_on_Corrosion_and_Coatings.
10. Picciochi, R., Ramos, A. C., Mendonça, M. H., & Fonseca, I. T. E. (2004). Influence of the Environment on the Atmospheric Corrosion of Bronze. *Journal of Applied Electrochemistry*, 34(10), 989 – 995. <https://doi.org/10.1023/b:jach.0000042667.84920.e2>.
11. Chang, T., Herting, G., Goidanich, S., Sánchez Amaya, J. M., Arenas, M. A., Le Bozec, N., Jin, Y., Leygraf, C., & Odnevall Wallinder, I. (2019). The role of Sn on the long-term atmospheric corrosion of binary Cu- Sn bronze alloys in architecture. *Corrosion Science*, 149, 54 – 67. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.01.002>.
12. Kimstach, T. V., Uzlov, K. I., Repiakh, S. I., & Solonenko, L. I. (2021). Analysis of different environments influence on copper alloys corrosion resistance. *Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals*, (3), 36–45. <https://doi.org/10.30838/j.pmhtml.2413.010721.36.780>
13. Kimstach, T. V., Uzlov, K. I., Usenko, R. V., & Solonenko, L. I. (2021). Corrosion resistance of bronze products. *Quality strategy in industry and education:*

materials. XVI International Conference, (June 2–5, 2021, Varna, Bulgaria). Varna: TU–Varna, 2021. pp. 78–83. URL: <https://nmetau.edu.ua/file/--sbornik-varna-2021-full.pdf>

14. Schüssler, A., & Exner, H. E. (1993). The corrosion of nickel-aluminium bronzes in seawater – II. The corrosion mechanism in the presence of sulphide pollution. *Corrosion Science*, 34(11), 1803–1815. [https://doi.org/10.1016/0010-938x\(93\)90018-c](https://doi.org/10.1016/0010-938x(93)90018-c)

15. Wharton, J. A., & Stokes, K. R. (2008). The influence of nickel-aluminium bronze microstructure and crevice solution on the initiation of crevice corrosion. *Electrochimica Acta*, 53(5), 2463 – 2473. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2007.10.047>

16. Kear, G., Barker, B. D., Stokes, K., & Walsh, F. C. (2004). Flow influenced electrochemical corrosion of nickel aluminium bronze. Part I. Cathodic polarisation. *Journal of Applied Electrochemistry*, 34(12), 1235–1240. <https://doi.org/10.1007/s10800-004-1758-1>

17. Wharton, J. A., Barik, R. C., Kear, G., Wood, R. J. K., Stokes, K. R., & Walsh, F. C. (2005). The corrosion of nickel–aluminium bronze in seawater. *Corrosion Science*, 47(12), 3336– 3367. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.05.053>

18. Kear, G., Barker, B. D., & Walsh, F. C. (2004). Electrochemical corrosion of unalloyed copper in chloride media – a critical review. *Corrosion Science*, 46(1), 109–135. [https://doi.org/10.1016/s0010-938x\(02\)00257-3](https://doi.org/10.1016/s0010-938x(02)00257-3)

19. Ferrara R. J., Caton T. E. (1982). Review of dealloying of cast aluminum bronze and nickel-aluminum bronze alloys in sea water service. *Materials Performance*. 21(2), 30–34

20. Chen, Y., Qi, D. M., Wang, H. P., Xu, Z., Yi, C. X., & Zhang, Z. (2015). Corrosion Behavior of Aluminum Bronze under Thin Electrolyte Layers Containing Artificial Seawater. *International Journal of Electrochemical Science*, 10(11), 9056–9072. [https://doi.org/10.1016/s1452-3981\(23\)11160-6](https://doi.org/10.1016/s1452-3981(23)11160-6)

21. Shanghai Jiao Tong University Press. (2018b). *Materials Corrosion and Protection* (ed. by Y. Huang & J. Zhang). De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110310054>

22. Salvadori, B., Cagnini, A., Galeotti, M., Porcinai, S., Goidanich, S., Vincenzo, A., Celi, C., Frediani, P., Rosi, L., Frediani, M., Giuntoli, G., Brambilla, L., Beltrami, R., & Trasatti, S. (2017). Traditional and innovative protective coatings for outdoor bronze: Application and performance comparison. *Journal of Applied Polymer Science*, 135(12), 46011. <https://doi.org/10.1002/app.46011>

23. Wu, W., Zhang, X., Chen, Y., Ji, J., Zhang, F., Guo, J., Zhao, T., Zhu, J., & Luo, H. (2024). Multifunctional organic-inorganic hybrid coating for enhanced bronze corrosion protection. *Journal of Cultural Heritage*, 69, 113–125. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.08.003>

24. Kumar, V., & Dwivedi, S. K. (2021). Toxicity potential of electroplating wastewater and its bioremediation approaches: a review. *Environmental Technology Reviews*, 10(1), 238–254. <https://doi.org/10.1080/21622515.2021.1983030>

25. Kimstach, T. V., & Uzlov, K. I. (2025). Chemical composition influence on mechanical properties of Cu-Al-Si-Sn-Mn system bronze during its solidification in die mold. *System technologies*, 2(157), 135–145. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-2-157-2025-14>

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

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

¹ *Ukrainian State University of Science and Technologies*

* *Corresponding author: t.v.kimstach@ust.edu.ua*

CORROSION OF BRONZES IN HUMID AIR AND SALT FOG

Abstract. *Introduction.* Corrosion is a widespread issue that is particularly critical for metal products. The consequences of corrosion may include social and environmental problems, accidents, and man-made disasters, among others. One of the approaches to addressing this problem is the use of structural bronze for manufacturing cast products, as it is resistant, particularly in natural gaseous environments. *Problem.* A promising bronze in this regard is the new structural non-magnetic bronze BrA7K2O1,5Mts0,3, whose corrosion resistance has not yet been studied. *Purpose.* To determine the kinetics and rate of unrelated corrosion in humid air and salt fog at 40 °C for bronzes of grades BrA10Zh4N4, BrA9Zh3L, BrO6Ts6S3, as well as BrA7K2O1,5Mts0,3 bronze before and after heat treatment. *Materials and Methods.* The study used cast samples of Ø40×10 mm made of BrA10Zh4N4, BrA9Zh3L, BrO6Ts6S3 bronzes, as well as BrA7K2O1,5Mts0,3 bronze before and after heat treatment. Corrosion kinetics were determined by measuring the change in sample mass over a period of 28 days. The mass of the samples was measured using analytical scales. The corrosion rate was calculated taking into account the density of the bronze in the samples, which was determined based on the results of hydrostatic weighing in water. *Results.* In humid air at 40 °C (according to accepted research methodology), all the bronzes used in this study are completely resistant. In salt fog at 40 °C, among the investigated bronzes, according to the ten-point corrosion resistance rating scale, BrA10Zh4N4 bronze has a resistance rating of 1, BrA7K2O1,5Mts0,3 bronze has a rating of 1–2, BrO6Ts6S3 bronze has a rating of 4, and BrA9Zh3L bronze has a rating of 5. A characteristic feature of the corrosion kinetics of all bronzes in humid air, as well as some bronzes in salt fog (except for BrA9Zh3L and BrO6Ts6S3), is the passivation of their surface after a certain period of exposure under the established conditions and environments in the study. *Conclusions.* The obtained data make it possible to assess the potential and feasibility of using cast products made of corrosion-resistant non-magnetic bronze BrA7K2O1,5Mts0,3 as a substitute for aluminum-based magnetic and non-magnetic tin-based bronzes. The use of cast parts made from this bronze will expand technical and operational capabilities, improve the reliability and durability of existing or newly developed equipment, devices, and other applications.

Key words: bronze, humid air, salt fog, corrosion, kinetics, corrosion rate, cast products.

For citation: Kimstach, T. V., & Repyakh, S. I. (2026). Corrosion of bronzes in humid air and salt fog. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 40, 195-212. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2026-40-012>

Рукопис надійшов до редакції / Received 13.03.2026

Рекомендовано до друку / Accepted 28.05.2026

Опубліковано / Published 30.05.2026