

УДК 620.193:622.646

- Воденніков С. А. д-р техн. наук, професор, професор кафедри машин і технологій ливарного виробництва Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: s_vodennikov@i.ua, ORCID: 0000-0002-5563-5244
- Скачков В. О. д-р техн. наук, доцент, професор кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки Інженерно навчально-наукового інституту ім. Ю. М. Потебні Запорізького національного університету, м. Запоріжжя, Україна, e-mail: skavira@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4447-4641
- Воденнікова О. С. провідний інженер кошторисного відділу Запорізького державного медико-фармакологічного університету, м. Запоріжжя, Україна, e-mail: olga.vodennikova@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3747-2779
- Гнатишак Р. В. аспірант Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю. М. Потебні Запорізького національного університету, м. Запоріжжя, Україна, e-mail: rgnatishak@gmail.com

МЕТОДИКА ПРИСКОРЕНИХ ВИПРОБУВАНЬ МАТЕРІАЛУ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ БАГАТОФАЗНИХ СПЛАВІВ

Мета роботи. На основі кількісної оцінки швидкостей корозії багатофазних металів та сплавів розробити методику прискорених корозійних випробувань в умовах електрохімічної корозії з визначенням швидкостей корозії по кожній фазі та масового корозійного пошкодження металоконструкцій протягом заданого часу їх експлуатації.

Методи дослідження. Досягнення рішення поставленої мети базується на застосуванні розрахунково-експериментальних методів оцінки електрохімічної корозії багатофазних сплавів з визначенням швидкостей корозії по кожній фазі окремо та швидкості окислення загалом по сплаву.

Отримані результати. Отримано кінцеві формули та методики проведення лабораторних експериментів з оцінки швидкостей корозії багатофазних сплавів. Наведено методики прискорених корозійних випробувань, що базуються на попередніх лабораторних дослідженнях з точним розрахунком технологічних параметрів пролонгованих на час експлуатації реальної конструкції в умовах електрохімічної корозії.

Наукова новизна. Розкрито нові механізми оцінки швидкостей корозії окремих фаз багатофазних сплавів залишкової мікронеоднорідності поверхні корозії в умовах невизначеної загальної товщини корозійного шару. Запропоновано алгоритм розрахунку технологічних параметрів прискорених випробувань, еквівалентних реальним умовам експлуатації металоконструкцій на основі багатофазних сплавів протягом заданого терміну експлуатації.

Практична цінність. Запропонований підхід дозволяє визначити кількісні параметри електрохімічної корозії металоконструкцій, розрахувати зниження несучої здатності та оцінити працездатність таких конструкцій протягом заданого терміну експлуатації.

Ключові слова: електрохімічна корозія, багатофазні сплави, прискорені випробування, швидкість окислення фаз, анодний електричний струм.

Вступ

Методи оцінки корозійної стійкості можна поділити на якісні та кількісні. Якісні дають змогу візуально встановити зміни мікрогеометрії поверхні металу або покриття, а також вид корозійного руйнування.

Для кількісної оцінки використовуються показники корозії, які встановлюють швидкість корозійних руйнувань чи зміну інших властивостей матеріалів.

Корозія характеризується руйнуванням металів і сплавів в результаті хімічного або електрохімічного впливу навколишнього середовища і є окислювально-відновним гетерогенним процесом, який відбувається на поверхні розділу фаз. Процес корозії ушкоджує поверхню металу та руйнування поширюється вглиб. При

цьому порушується однорідність поверхні металу з утворенням

заглиблень різних розмірів як у плані, так і за глибиною [1].

Аналіз досліджень та публікацій

Корозія може бути рівномірною, що протікає з однаковою швидкістю по всій поверхні металоконструкції, нерівномірною, що протікає з неоднаковою швидкістю на різних ділянках поверхні, або вибірковою, при якій руйнуються окремі компоненти або фази сплаву. Швидкість вибіркової корозії можна визначити по глибині пошкодження, що утворилися [2, 3].

Процес корозії зазвичай реалізується за двома механізмами. Перший механізм – прямий хімічний вплив навколишнього середовища на металоконструкцію. Другий механізм – електрохімічні реакції, що супроводжуються проходженням електричного струму між окремими ділянками чи фазами поверхні сплаву. Особливістю електрохімічної корозії є поділ процесів іонізації атомів металу та процесів відновлення окисного компонента корозійного середовища. Необхідними умовами протікання електрохімічної корозії є наявність електроліту та обов'язковий перебіг електричного струму. Для реалізації процесів електрохімічної корозії потрібна наявність двох ділянок металу з різним потенціалом у розчині електроліту. При цьому на поверхні багатофазного металу на різних ділянках утворюється ряд корозійних гальванічних елементів [4, 5].

Досить часто для оцінки корозійної стійкості металевих конструкцій застосовуються прискорені випробування в кліматичних камерах. Прискорені корозійні випробування в кліматичних камерах дають можливість отримання порівняльних результатів по корозійній стійкості різних металів і сплавів [6–8]. До успішно застосовуваних прискорених методів корозійних випробувань металевих матеріалів відносяться випробування в камері сольового туману [8]. При випробуваннях в умовах впливу сольового туману можна забезпечити імітацію тропічного клімату, морського туману та інших корозійнонебезпечних погодних умов. Проте збудувати систему прискорених випробувань, які повністю відповідають умовам натурних випробувань, досить складно.

У роботі [9] за результатами випробувань у камері сольового туману сплаву Д16 показано, що кількісні результати при прискорених випробуваннях з недостатньою точністю відповідають результатам натурних випробувань.

Найбільш перспективними напрямками розробки методів та режимів прискорених корозійних випробувань є такі, що забезпечують максимально високий ступінь кореляції з корозійними процесами в натурних умовах [8, 10–12].

Одним із прийнятних варіантів прискорених випробувань металів та сплавів в умовах електрохімічної корозії можуть бути використані механізми анодного окислення, в умовах яких з'являється можливість кількісної оцінки швидкостей корозії як окремих фаз, так і наведеної середньої швидкості корозії [4, 5, 13, 14].

Мета роботи

На основі побудованого механізму, розрахункової оцінки швидкостей корозії багатофазних металів та сплавів в умовах електрохімічної корозії, розробити методику прискорених корозійних випробувань з визначенням швидкостей корозії за кожною фазою та масового корозійного пошкодження металоконструкцій протягом заданого часу їх експлуатації.

Матеріал і методика досліджень

1 Розрахунок швидкостей корозії багатофазних металів та сплавів

Розглядається багатофазний метал, що складається з N фаз. У цьому випадку кожна фаза займає поверхню S_i , тоді відносна частка поверхні P_i фази сорту i визначиться:

$$P_i = \frac{S_i}{\sum_{i=1}^N S_i}, \quad (1)$$

де S_i – частина поверхні, зайнятої фазою сорту i ;
 P_i – відносна частка поверхні фази сорту i .

З умови суцільності поверхні сплаву випливає умова:

$$\sum_{i=1}^N P_i = 1. \quad (2)$$

Усереднена щільність металу визначиться:

$$q = \sum_{i=1}^N q_i P_{oi}, \quad (3)$$

де q_i – густина i -тої фази;

P_{oi} – об'ємний вміст i -тієї фази.

Враховуючи, що швидкості окислення фаз будуть індивідуальними, для їхнього окислення знадобиться струм I_i^a . Загальний анодний струм може бути визначений:

$$I^a = \sum_{i=1}^N I_i^a, \quad (4)$$

де I^a – загальний анодний струм при електрохімічному окисненні металу.

Щільність анодного струму з урахуванням (1) визначається:

$$i^a = \frac{I^a}{\sum_{i=1}^N S_i}. \quad (5)$$

Враховуючи (5) та (1) щільність анодного струму по кожній фазі можна визначити:

$$i_i^a = i^a \cdot P_i. \quad (6)$$

Середня швидкість окислення V_{cp} визначається за формулою:

$$V_{cp} = k \frac{m - m_0}{f \omega_0 \tau}, \quad (7)$$

де m, m_0 – маса зразка до і після окислення, відповідно;
 f – фактор шорсткості;
 ω_0 – площа поверхні окислення у плані;
 τ – час окислення;
 k – коефіцієнт позитивності швидкості корозії ($k = \pm 1$).

Після проведення режиму окислення робоча поверхня очищається і на приладі МП-4 визначають профіль поверхні окислення шляхом вимірювання величин h_i – висоти виступів або заглиблень поверхні [15].

Виміряна неоднорідність окисленої поверхні є величинами $h_i (i = \overline{1, N})$. Середня величина глибини неоднорідностей визначиться:

$$h_{\text{ср.}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i. \quad (8)$$

Середня товщина окисленого шару $t_{\text{ср.}}$ може бути обчислена:

$$t_{\text{ср.}} = \frac{m - m_0}{f \omega_0 q}, \quad (9)$$

де q – щільність сплаву.

Середню товщину окисленого шару можна визначити співвідношенням, де:

$$t_{\text{ср.}} = t_0 + h_{\text{ср.}} \quad (10)$$

де t_0 – не вимірювана величина окисленого шару, загальна всім фазам.

Величина t_0 може бути обчислена за формулою (10) з урахуванням вимірних значень (8) та (9):

$$t_0 = t_{\text{ср.}} - h_{\text{ср.}}. \quad (11)$$

Товщина окисленого шару i -тої фази визначиться:

$$t_i = t_0 + h_i - h_{\text{ср.}} \quad (12)$$

Загальна маса окисленої фази сорту i визначиться:

$$m_i = t_i \cdot \omega \cdot f \cdot q_i \cdot P_i. \quad (13)$$

З урахуванням (13) швидкість окислення i -тої фази визначиться:

$$V_i = k \frac{m_i}{f \cdot \omega_0 \cdot \tau \cdot P_i}. \quad (14)$$

Кількість електрики, необхідної для окислення i -тої фази протягом часу, визначиться:

$$Q_i = V_i \tau = \frac{i_i^a}{Z_i F} \cdot \tau, \quad (15)$$

де i_i^a – анодний струм по i -тій фазі (6);

Z_i – валентність катіону металу по i -тій фазі;

F – число Фарадея.

2 Розрахунок параметрів прискорених випробувань

Загальна кількість електрики, спожитої на окислення сплаву, в умовах експерименту, за час визначиться:

$$Q = \sum_{i=1}^N Q_i P_{0i}, \quad (16)$$

де P_{0i} – об'ємна частка i -тієї фази.

В умовах прискорених випробувань металокопструкцій на основі багатофазних сплавів має бути виконана умова:

$$Q^y = Q \cdot \tau^k / \tau^y, \quad (17)$$

де Q^y – необхідна кількість електрики щодо прискорених випробувань.

τ^k – час роботи реальної металокопструкції в умовах електрохімічної корозії.

Розмір Q^y задається співвідношенням:

$$Q^y = \sum_{i=1}^N Q_i^y P_{0i}, \quad (18)$$

де Q_i^y – кількість електрики, необхідної щодо прискореного окислення i -тої фази.

Розмір Q_i^y з урахуванням (15) визначається з рівняння:

$$Q_i^y = V_i^y \tau^y = \frac{i_i^{ay}}{Z_i F} \tau^y. \quad (19)$$

З рівняння (19) величина i_i^{ay} , що задається за умов прискорених випробувань, визначиться:

$$i_i^{ay} = Q_i^y \cdot Z_i \cdot F / \tau^y. \quad (20)$$

Величини i_i^{ay} (20) дозволяють визначити загальне значення анодного струму в умовах прискорених випробувань:

$$i^{ay} = \sum_{i=1}^N i_i^{ay}. \quad (21)$$

Отже, задаючи величину анодного струму (21) і витримку в умовах електрохімічного окислення зразка сплаву протягом часу τ^y будуть задані розрахункові параметри процесу прискорених випробувань протягом часу експлуатації τ^y металокопструкції на основі багатофазного сплаву.

3 Схема проведення прискорених випробувань

Зразки зі сплаву заданої марки готуються за такою схемою:

- полірування робочої поверхні;
- високотемпературний відпал у середовищі захисного газу - аргону;
- електрополірування робочої поверхні;
- контроль геометричної неоднорідності робочої поверхні за методикою;
- розрахунок істинної площі робочої поверхні зразків:

$$\omega = f \omega_0, \quad (22)$$

де ω_0 – величина площі поверхні окислення в плані.

Проведення процесу прискореної корозії підготовлених зразків реалізується за таким режимом:

- розраховується величина анодного струму i_t^{ay} , формула (21);
- зважується зразок з точністю до четвертого знака – m_0 ;
- зразок встановлюється на стенді електрохімічного окиснення;
- на стенді встановлюється величина розрахункового анодного струму i^{ay} ;
- процес окислення триває протягом часу τ_y ;
- після окислення зразок промивається проточною водою та висушується;
- визначається маса зразка - m_k ;
- розраховується середня швидкість окислення:

$$V_{cp.} = k \frac{m_k - m_0}{f \omega_0 \delta_k}; \quad (23)$$

- визначається геометрична неоднорідність окисленої поверхні дослідних зразків з застосуванням мікроінтерферометра МП-4 з фіксацією величин кожної фази [15];

$$h_i (i = \overline{1, N});$$

- визначається товщина окисленого шару по кожній фазі, формула (12);
- обчислюється маса та швидкість окислення кожної фази, формули (13), (14).

В результаті прискорених випробувань зразків заданої марки сплавів для будівельних металоконструкцій, що експлуатуються протягом τ_y часу, визначається:

- сумарна маса окисленого шару робочої поверхні;
- середня швидкість окислення робочої поверхні;
- товщина окисленого шару по кожній фазі робочої поверхні;
- маса окисленої частини по кожній фазі сплаву;
- швидкість окислення кожної фази сплаву.

Важливе значення мають дані по товщині окисленого шару кожної фази сплаву для оцінки пітингової корозії, найбільш характерної для металоконструкцій зі складнолегованих сталей.

Висновки

1. Наведено методологію проведення комплексу досліджень з оцінки швидкостей процесів корозії багатofазних сплавів, розрахунків швидкостей корозії окремих фаз, методів прискорених корозійних випробувань.

2. Побудований алгоритм розрахунку швидкостей корозії фаз та процедура експериментального їх визначення методом вимірювання геометричної неоднорідності поверхні окислення із застосуванням мікроінтерферометра МП-4.

3. Розроблено методику прискорених випробувань процесу корозії багатofазних сплавів на основі еквівалентної витрати кількості електрики в умовах атмосферної корозії будівельних конструкцій протягом

заданого часу та в умовах електролітичного окиснення.

Список літератури

1. Розенфельд И. Л. Ускоренные методы коррозионных испытаний металлов (теория и практика) [Текст] / И. Л. Розенфельд, К. А. Жигалова. – М. : Металлургия, 1966. – 348 с.

2. Реформатская И. И. Влияние структурно-фазовых неоднородностей углеродистых и низколегированных трубных сталей на развитие локальных коррозионных процессов [Текст] / И. И. Реформатская, В. В. Завьялов, А. Н. Подобаев [и др.] // Защита металлов. – 1999. – Т. 35. – № 5. – С. 472–480.

3. Замалетдинов И. И. О новейших методах изучения процессов питтинговой коррозии [Текст] / И. И. Замалетдинов, Е. А. Колобова. // Техника. Технологии. Инженерия. – 2017. – №1(3). – С. 36–45.

4. Потенциостатическое исследование питтингообразования низколегированных сталей [Текст] / А. А. Трофимов, О. В. Ярославцева, В. М. Рудой, Н. И. Останин // Международном научном форуме «Бутлеровское наследие – 2015». – 2015. – Т. 42. – № 6. – С. 41–47.

5. Влияние скорости развёртки при потенциодинамической поляризации на критерии питтингостойкости нержавеющей сталей [Текст] / Е. В. Плешкова, С. С. Виноградова, Р. В. Тагиева, Р. А. Кайдриков // Вестник технологического университета. – 2017. – Т. 20. – № 6. – С. 51–53.

6. Каблов Е. Н. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии [Текст] / Е. Н. Каблов, О. В. Старцев, И. М. Медведев // Авиационные материалы и технологии. 2015. – № 2 (35). – С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.

7. Чесноков Д. В. Метод ускоренных лабораторных испытаний алюминиевых сплавов с целью прогнозирования их коррозионной стойкости в условиях морской атмосферы [Текст] / Д. В. Чесноков, В. В. Антипов, Н. В. Кулюшина // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2016. – №5 (41). – С. 92–99.

8. Кутырев А. Е. Моделирование воздействия испытательных факторов на коррозию металлических материалов при испытании на агрессивное воздействие компонентов промышленной атмосферы в камере солевого тумана [Текст] / А. Е. Кутырев, М. А. Фомина, Д. В. Чесноков // Материаловедение. – 2015. – № 3. – С. 7–15.

9. Ускоренные испытания сплава Д16 в соляном тумане. Масса удержанных хлоридов, коррозия, механические свойства [Текст] / П. В. Стрекалов, Ю. М. Панченко, В. П. Жиликов и др. // Коррозия : материалы, защита. – 2007. – № 10. – С. 1–8.

10. Кутырев А. Е. Анализ данных по натурным испытаниям алюминиевых сплавов и разработка концепции их комплексных коррозионных испытаний [Текст] / А. Е. Кутырев, Д. В. Чесноков // III Междунар. науч.-технич. конф. «Коррозия, старение и биостойкость материалов в морском климате» (Геленджик, 07 сент.

2018 г.). М., 2018. – С. 80–96.

11. Ускоренные циклические коррозионные испытания авиационных материалов [Текст] / М. Г. Курс, А. Е. Кутырев, П. Ф. Киричок, М. А. Фомина // Труды ВИАМ : Испытания материалов. – 2019. – №10 (82). – С. 61–75. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-61-75.

12. Разработка раствора для нанесения коррозионных поражений на алюминиевых сплавах в гальваностатическом режиме [Текст] / А. Е. Кутырев, Д. В. Чесноков, В. В. Антипов, А. И. Вдовин // Труды ВИАМ. – 2018. – 9 (69). – С. 105–118. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-105-118

13. Воденников С. А. Захисно-зміцнювальні покриття на арматурних сталях [Текст] / С. А. Воденников, В. О. Скачков, О. С. Воденникова // Металознавство та обробка металів. – 2020. – № 4. – С. 39–46.

14. Воденникова О. С. Модель для оценки прочности металлической арматуры в процессе длительной эксплуатации строительных конструкций [Текст] / О. С. Воденникова, В. А. Банах, В. А. Скачков // Містобудування та територіальне планування: Наук.-техн. збірник. – К. : КНУБА. – 2015. – Вип. 55. – С. 14–18.

15. Воденникова О. С. Оценка электрохимического окисления многофазных металлов и сплавов [Текст] / В. А. Скачков, О. С. Воденникова, С. А. Воденников // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні / Науковий журнал. – Запоріжжя : ЗНТУ. – 2019. – № 1. – С. 79–85.

Одержано 01.06.2023

METHOD OF ACCELERATED MATERIAL TESTING METAL CONSTRUCTION BASED ON MULTIPHASE ALLOYS

- Vodennikov S. Dr. Sc., Professor, Professor of the Department of Foundry Machines and Technology, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: s_vodennikov@i.ua, ORCID: 0000-0002-5563-5244
- Skachkov V. Dr. Sc., docent, Professor of the Department of Metallurgical Technologies, ecology and man-made safety Engineering, Institute of Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: skavira@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4447-4641
- Vodennikova O. Leading engineer of the Estimation department, Zaporizhzhia State Medical and Pharmaceutical University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: olga.vodennikova@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3747-2779
- Gnatishak R. Postgraduate student, Engineering Institute of Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: rgnatishak@gmail.com

Purpose. Based on the quantitative assessment of the corrosion rates of multiphase metals and alloys, methodology for accelerated corrosion tests under conditions of electro-chemical corrosion with the determination of corrosion rates for each phase and mass corrosion damage of metal structures during the specified time of their operation was developed.

Research methods. Achieving the solution of the set goal is based on the application of computational and experimental methods of evaluating the electro-chemical corrosion of multi phase alloys with the determination of corrosion rates for each phase separately and oxidation rates in general for the alloy.

Results. The final formula and methods of conducting laboratory experiments on the assessment of corrosion rates of multi phase alloys were obtained. Methods of accelerated corrosion tests based on preliminary laboratory studies with accurate calculation of technological parameters prolonged during the operation of a real structure in conditions of electro-chemical corrosion are given.

Scientific novelty. New mechanisms for estimating the corrosion rates of individual phases of multiphase alloys of the residual micro-heterogeneity of the corrosion surface under conditions of an uncertain total thickness of the corrosion layer was shown. An algorithm for calculating the technological parameters of accelerated tests, equivalent to the real conditions of operation of metal structures based on multiphase alloys during the given period of operation, is proposed.

Practical value. The proposed approach makes it possible to determine the quantitative parameters of electrochemical corrosion of metal structures, calculate the reduction in load-bearing capacity, and assess the performance of such structures during a given period of operation.

Key words: electrochemical corrosion, multiphase alloys, accelerated tests, oxidation rate of phases, anodic electric current.

References

1. Rozenfeld, Y. L., Zhyhalova, K. A. (1966). Uskorennyye metody korrozionnykh ispytaniy metallov (teoriya i praktika) [Accelerated methods of corrosion testing of metals (theory and practice)]. Moscow, Russia: Metallurgy, 368.
2. Reformatskaia, I. I., Zavalov, V. V., Podobaev, A. N. (1999). Vliyaniye strukturno-fazovykh neodnorodnostey uglerodistykh i nizkolegirovannykh trubnykh staley na razvitiye lokal'nykh korrozionnykh protsessov [Influence of structural-phase inhomogeneities of carbon and low-alloy pipe steels on the development of local corrosion processes]. *Metal protection*, 35 (5), 472–480.
3. Zamaletdinov, I. I., Kolobova, Ye. A. (2017). O noveyshikh metodakh izucheniya protsessov pittingovoy korrozii [On the latest methods for studying the processes of pitting corrosion]. *Technique. Technologies. Engineering*, 1 (3), 36–45.
4. Trofimov, A. A., Yaroslavtseva, O. V., Rudoy, V. M., Ostanin, N. I. (2015). Potentsiostaticheskoye issledovaniye pittingoobrazovaniya nizkolegirovannykh staley [Potentiostatic study of pitting formation of low alloy steels]. *International scientific forum “Butlerov heritage – 2015”*, 42 (6), 41–47.
5. Pleshkova, Ye. V., Vinogradova, S. S., Taziyeva, R. V., Kaydrikov, R. A. (2017). Vliyaniye skorosti razvortki pri potentsiodinamicheskoy polarizatsii na kriterii pittingostoykosti nerzhaveyushchikh staley [Influence of the sweep rate during potentiodynamic polarization on the criteria for the pitting resistance of stainless steels]. *Bulletin of the Technological University*, 20 (6), 51–53.
6. Kablov, Ye. N., Startsev, O. V., Medvedev, I. M. (2015). Obzor zarubezhnogo opyta issledovaniy korrozii i sredstv zashchity ot korrozii [Review of foreign experience in corrosion research and corrosion protection]. *Aviation materials and technologies*, 2 (35), 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
7. Chesnokov, D. V., Antipov, V. V., Kulyushina N. V. (2016). Metod uskorennykh laboratornykh ispytaniy alyuminiyevykh splavov s tsel'yu prognozirovaniya ikh korrozionnoy stoykosti v usloviyakh morskoy atmosfery [Method of accelerated laboratory testing of aluminum alloys in order to predict their corrosion resistance in a marine atmosphere]. *Proceedings of VIAM: electron. scientific and technical magazine*, 5 (41), 92–99.
8. Kutayev, A. Ye., Fomina, M. A., Chesnokov, D. V. (2015). Modelirovaniye vozdeystviya ispytatel'nykh faktorov na korroziyu metallicheskikh materialov pri ispytanii na agressivnoye vozdeystviye komponentov promyshlennoy atmosfery v kamere solevogo tumana [Simulation of the effect of test factors on the corrosion of metallic materials when testing for the aggressive effect of industrial atmosphere components in a salt spray chamber]. *Materials Science*, 3, 7–15.
9. Strekalov P. V., Panchenko YU. M., Zhilikov V. P. et al. (2007). Uskorennyye ispytaniya splava D16 v solyanom тумане. Massa uderzhannykh khloridov, korroziya, mekhanicheskiye svoystva [Accelerated testing of D16 alloy in salt fog. Mass of retained chlorides, corrosion, mechanical properties]. *Corrosion: materials, protection*, 10, 1–8.
10. Kutayev, A. Ye., Chesnokov, D. V. (2018). Analiz dannykh po naturnym ispytaniyam alyuminiyevykh splavov i razrabotka kontseptsii ikh kompleksnykh korrozionnykh ispytaniy [Analysis of data on natural tests of aluminum alloys and development of the concept of their complex corrosion tests]. III International Scientific and Technical. conf. “Corrosion, aging and biostability of materials in a marine climate” (Gelendzhik, September 07, 2018), 80–96.
11. Kurs M. G., Kutayev A. Ye., Kirichok, P. F., Fomina, M. A. (2019). Uskorennyye i tsiklicheskiye korrozionnyye ispytaniya aviatsionnykh materialov [Accelerated and cyclic corrosion tests of aviation materials]. *Proceedings of VIAM*, 10 (82), 61–75. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-61-75.
12. Kutayev, A. Ye., Chesnokov, D. V., Antipov, V. V., Vdovin, A. I. (2018). Razrabotka rastvora dlya naneseniya korrozionnykh porazheniy na alyuminiyevykh splavakh v galvanostaticheskom rezhime [The development of a solution for promotion of corrosion attack on aluminium alloys in a galvanostatic mode]. *Proceedings of VIAM*, 9 (69), 11. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-105-118.
13. Vodennikov S. A., Skachkov V. O. Vodennikova O. S. (2020). Zakhysno-zmitsnyuval'ni pokryttya na armaturnykh stalyakh [Zakhysno-zmitsnyuvalni pokryttya on reinforcing steels]. *Metallurgy and metal processing*, 4, 39–46.
14. Vodennikova, O. S., Banakh, V. A. Skachkov, V. A. (2015). Model' dlya otsenki prochnosti metallicheskoy armatury v protsesse dlitel'noy ekspluatatsii stroitel'nykh konstruktsey [Model for assessing the strength of metal reinforcement during long-term operation of building structures]. *Mistobuduvannya and territorial planning*, 55, 14–18.
15. Skachkov, V. O., Vodennikova, O. S., Vodennikov, S. A. (2019). Otsenka elektrokhimicheskogo okisleniya mnogofaznykh metallov i splavov [Evaluation of the electrochemical oxidation of multiphase metals and alloys]. *New materials and technologies in metallurgy and machine-building*, 1, 79–85.