

УДК 629.463.001.63

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-17>

МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ НЕСУЧИХ СИСТЕМ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ З УРАХУВАННЯМ ЇХ КОРОЗІЙНОЇ ДЕГРАДАЦІЇ

Фомін Олексій Вікторович,

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри вагонів та вагонних споруд
Освітньо-наукового Київського інституту залізничного транспорту,
Національного транспортного університету
ORCID ID: 0000-0003-2387-9946

Бурлуцький Олексій Вікторович,

кандидат технічних наук,
доцент кафедри комп'ютерного моделювання
та інтегрованих технологій обробки тиском
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»
ORCID ID: 0000-0003-1902-5809

Фоміна Анна Миколаївна,

доктор філософії,
старший викладач кафедри рухомого складу транспортних систем
Приазовського державного технічного університету
ORCID ID: 0000-0002-9810-8997

Любимова-Зінченко Ольга Валентинівна,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри фармації, виробництва та технологій
Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля
ORCID ID: 0000-0001-7510-5366

Черкашин Олександр Петрович,

аспірант кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин
Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля
ORCID ID: 0009-0006-6871-0860

У статті розглядаються методичні основи комплексного підходу до моделювання та оцінки надійності несучих систем транспортних засобів, що працюють в умовах інтенсивної корозійної деградації. Актуальність дослідження зумовлена критичним впливом корозії на безпеку, ресурс та економічну ефективність експлуатації різноманітних одиниць рухомого складу.

Метою роботи є розробка інтегрованого інструментарію, що дозволяє прогнозувати зміну несучої здатності конструкцій з часом.

Для досягнення мети автори використовують сучасні комп'ютерні технології та методи, включаючи системний аналіз, статистичну обробку даних про відмови, ймовірнісні моделі та комп'ютерне моделювання методом скінченних елементів для аналізу напружено-деформованого стану з урахуванням втрати матеріалу. Розроблений підхід інтегрує моделі корозійного пошкодження різних типів (рівномірної, піттингової) в загальні моделі структурної надійності. Автоматизація розрахунків за рахунок спеціального програмного забезпечення підвищує точність прогнозування залишкового ресурсу.

Результати дослідження доводять, що ігнорування фактора корозії призводить до небезпечної переоцінки терміну безвідмовної роботи. Встановлено ключові параметри впливу, що дозволяють оптимізувати конструктивні рішення та матеріали для підвищення корозійної стійкості. Запропоновані методики становлять основу для переходу від планово-попереджувального технічного обслуговування до стратегії, заснованої на фактичному стані конструкції, що значно підвищує безпеку та економічну ефективність у сфері транспортних технологій. Розробки мають широкий потенціал для впровадження при проектуванні, виробництві та експлуатації різних видів транспортних засобів.

Ключові слова: транспорт, транспортні технології, несучі системи, комп'ютерні технології, автоматизація, комп'ютерне моделювання, надійність, корозія.

Fomin Oleksii, Burlutsky Oleksii, Fomina Anna, Liubymova-Zinchenko Olha, Cherkashin Oleksandr.
Modeling and life prediction of corroded vehicle frame structures: a reliability-based approach

The article presents on methodological foundations for a comprehensive approach to modeling and assessing the reliability of load-bearing systems in vehicles operating under conditions of intensive corrosive degradation. The relevance of the study is determined by the critical impact of corrosion on the safety, service life, and economic efficiency of various rolling stock units.

The aim of the work is to develop an integrated toolkit that allows predicting changes in the load-bearing capacity of structures over time. To achieve this goal, the authors utilize modern computer technologies and methods, including systems analysis, statistical processing of failure data, probabilistic models, and computer modeling using the finite element method to analyze the stress-strain state considering material loss. The developed approach integrates models of various types of corrosion damage (uniform, pitting) into general structural reliability models. The automation of calculations through specialized software enhances the accuracy of residual life prediction.

The study results prove that ignoring the corrosion factor leads to a dangerous overestimation of the mean time between failures. Key influence parameters have been established, enabling the optimization of design solutions and materials to improve corrosion resistance. The proposed methodologies form the basis for transitioning from scheduled preventive maintenance to a condition-based strategy, significantly enhancing safety and economic efficiency in the field of transport technologies. The developments have broad potential for implementation in the design, production, and operation of various types of transport vehicles.

Key words: transport, transport technologies, load-bearing systems, computer technologies, automation, computer modeling, reliability, corrosion.

Вступ. Сучасний транспортний сектор відіграє ключову роль у світовій економіці, забезпечуючи мобільність товарів та пасажирів. Надійність транспортних засобів є фундаментальним аспектом, що безпосередньо впливає на безпеку, економічну ефективність та екологічність експлуатації. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року передбачає продовження європейських транспортних коридорів в східному напрямку і активну участь у перевізному процесі євразійського транзиту в рамках вимог та нормативів Євросоюзу [1].

Саме тому актуальність науково-прикладних досліджень у сфері моделювання та оцінки надійності несучих систем транспортних засобів, особливо з урахуванням корозійної деградації, набуває особливого значення. Корозія – це незворотний процес руйнування металів внаслідок хімічної або електрохімічної взаємодії з навколишнім середовищем. Цей процес є одним із головних факторів, що обмежують термін служби несучих елементів транспортних засобів.

Ігнорування корозійних процесів призводить до непередбачених відмов, що можуть мати катастрофічні наслідки. Руйнування несучих конструкцій через корозію може спричинити аварії з людськими жертвами та значними матеріальними збитками. Експлуатація транспортних засобів із пошкодженими корозією елементами є прямою загрозою безпеці дорожнього руху. Навіть незначна корозія може значно знизити несучу здатність конструкції, роблячи її вразливою до динамічних навантажень. Відновлення та ремонт пошкоджених корозією елементів вимагає значних фінансових та часових витрат. Запобігання корозії та своєчасна оцінка

її впливу є значно економічнішими за усунення наслідків.

Втрата надійності транспортних засобів через корозію призводить до збільшення витрат на технічне обслуговування та ремонт. Передчасний вихід з ладу транспортних засобів знижує їхню рентабельність та потребує додаткових інвестицій у оновлення парку. Необхідність частих ремонтів через корозію негативно впливає на загальну продуктивність транспортних підприємств. Крім того, непередбачені поломки, спричинені корозією, можуть призвести до затримок у доставці вантажів та пасажирів, що негативно позначається на логістичних ланцюгах. Це також може підірвати репутацію перевізника, призводячи до втрати клієнтів.

Науково-прикладні дослідження в цій галузі дозволяють розробити методичні основи для прогнозування поведінки несучих систем. Створення адекватних математичних моделей для опису процесів корозійної деградації є першочерговим завданням. Ці моделі повинні враховувати різні види корозії: рівномірну, точкову, міжкристалітну, щільну та інші. Необхідно також розробити методики для оцінки впливу корозії на втомну міцність матеріалів. Адже саме втома, прискорена корозією, є однією з найпоширеніших причин руйнування несучих елементів.

Розробка та впровадження нових методів неруйнівного контролю для виявлення корозійних пошкоджень є критично важливими. Застосування сучасних сенсорних технологій дозволить моніторити стан несучих систем у режимі реального часу. Це дасть змогу завчасно виявляти потенційні проблеми та планувати профілактичні заходи. Дослідження також мають

бути спрямовані на розробку нових матеріалів з підвищеною корозійною стійкістю та захисних покриттів. Впровадження інноваційних технологій поверхневої обробки може значно підвищити довговічність транспортних засобів.

Оцінка надійності з урахуванням корозійної деградації дозволяє оптимізувати інтервали технічного обслуговування. Це дає можливість перейти від планово-запобіжних ремонтів до ремонтів за фактичним станом. Такий підхід є значно ефективнішим та економічнішим. Прогнозування залишкового ресурсу транспортних засобів з урахуванням корозії дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо їх подальшої експлуатації або виведення з експлуатації. Це мінімізує ризики аварій та оптимізує витрати.

Результати цих досліджень мають пряме практичне застосування у проектуванні нових транспортних засобів. Вони дозволяють закладати в конструкції більш стійкі до корозії рішення та матеріали. Це значно підвищить початкову надійність та довговічність транспортних засобів. Також отримані знання будуть корисними для розробки рекомендацій щодо експлуатації та обслуговування існуючого парку. Це включає розробку ефективних стратегій захисту від корозії та ремонтних технологій.

Важливим аспектом є також розробка програмного забезпечення для моделювання та оцінки надійності. Це дозволить автоматизувати складні розрахунки та підвищити точність прогнозування. Створення інтегрованих систем моніторингу та діагностики, що враховують корозійні процеси, є наступним кроком. Ці системи зможуть в реальному часі аналізувати дані про стан несучих систем та видавати рекомендації. Наявність таких систем дозволить підвищити безпеку експлуатації та мінімізувати ризики.

Отже, актуальність проведення науково-прикладних досліджень з обраного напрямку є беззаперечною. Ці дослідження є критично важливими для забезпечення безпеки, економічної ефективності та екологічної сталості транспортного сектору. Вони дозволяють підвищити довговічність транспортних засобів, знизити експлуатаційні витрати та мінімізувати ризики аварій. Це забезпечить сталий розвиток транспортної галузі та підвищить її конкурентоспроможність на світовому ринку. Враховуючи глобальні тенденції, ці дослідження мають стати пріоритетними для наукової спільноти та інженерної галузі.

Аналіз інформаційних джерел з досліджуваної тематики. У статті [2] розглядається проблема прогнозування та запобігання

корозії критично важливих елементів залізничних вантажних вагонів, зокрема шворневої балки. Автори досліджують агресивний вплив експлуатаційного середовища та розвивають підходи до моделювання корозійних процесів. Встановлено, що прогнозований розподіл корозії в часі є основою для розробки нових стандартів та нормативів у вагонобудуванні, спрямованих на забезпечення безпечної експлуатації рухомого складу. Методика дозволяє оцінити вплив корозії на надійність конструкцій та обґрунтувати заходи щодо продовження терміну їх служби.

У науковій роботі [3] розглядається ймовірнісний метод оцінки надійності корозійно-пошкоджених рам транспортних засобів. Автори використали метод Монте-Карло для аналізу впливу випадкових факторів. Результати показали, що традиційні детерміновані методи можуть недооцінювати ризик руйнування. Запропоновано новий критерій оцінки залишкової міцності.

Стаття [4] пропонує методику прогнозування залишкового ресурсу конструкцій, що працюють у умовах корозійно-втомного руйнування. Автори поєднали експериментальні дані з числовим моделюванням. Встановлено, що поєднання корозії та циклічних навантажень прискорює деградацію матеріалів. Методика дозволяє точніше оцінювати термін експлуатації.

У цій [5] статті узагальнено принципи, технічні характеристики, методи характеристики та тенденції розвитку електрохімічних і фізичних технологій моніторингу корозії арматури в бетоні. Огляд може бути корисною відправною точкою для подальших досліджень.

У дослідженні [6] за допомогою калібрувального тесту було встановлено, що співвідношення між швидкістю зміни напруги, вимірюваною за допомогою MCD, та швидкістю корозії сталевих арматур є лінійним, а корозію сталевих арматур можна кількісно виявити за допомогою лінійної формули апроксимації. Прискорені випробування на корозію залізобетонних балок із вбудованим датчиком показали, що прилад MCD для виявлення корозії сталі має високу точність вимірювання, а крива, що змінюється в часі. Запропоновано новий підхід до розрахунку безпечного ресурсу конструкцій.

Дослідження [7] присвячене визначенню оптимальних параметрів ємнісного накопичувача енергії для рухомого складу метрополітену. Автори поєднали теоретичні розрахунки з експериментальними випробуваннями, що дозволило обґрунтувати вибір ключових характеристик системи. Результати показали, що застосування таких накопичувачів може

значно підвищити енергоефективність рухомого складу. Особлива увага приділена методам розрахунку ємності та напруги, необхідних для стабільної роботи.

У статті [8] розглядається корозію трубопроводів, що зазнали просторово-часового землетрусу, щоб проілюструвати ймовірність відмови в умовах багаторазового навантаження. Віб्राція трубопроводу була змодельована як зв'язане тривимірне рівняння вібрації з урахуванням невизначених параметрів ґрунту. Методика дозволяє оцінити ймовірність руйнування з урахуванням реальних умов експлуатації трубопроводу.

У статті [9] розглядається проблема вибору раціональних параметрів ємнісного накопичувача для підземного транспорту. Автори запропонували методику розрахунку, яка враховує специфічні умови експлуатації, такі як обмежений простір і високі динамічні навантаження. Встановлено, що оптимальні параметри системи залежать від режимів гальмування та прискорення. Результати дослідження можуть бути використані для проектування більш ефективних систем рекуперації енергії.

Дослідження [10] присвячене чисельному моделюванню та програмне моделювання на сьогоднішній день є дуже ефективними інструментами як для розуміння та прогнозування процесів корозії, так і для захисту металевих компонентів. Програмне забезпечення COMSOL Multiphysics надає перевірені математичні моделі, які можуть бути використані для певної геометрії як інструмент для прогнозування та запобігання корозії компонентів. У цій роботі було досліджено корозію оцинкованих сталевих листів шляхом порівняння результатів моделювання з лабораторними випробуваннями, проведеними в сольовому тумані. Робота має важливе значення для проектування більш довговічних конструкцій.

У статті [11] визначено критичний рівень корозії, при якому сталеві рами транспортних засобів втрачають несучу здатність. Автори провели серію механічних випробувань зразків з різним ступенем корозійного ушкодження. Встановлено, що втрата маси понад 15-20% призводить до катастрофічного зниження міцності. Результати дозволяють встановити обґрунтовані межі безпечної експлуатації.

Робота [12] демонструє ефективність методу акустичної емісії (АЕ) для ранньої діагностики корозії арматури в залізобетонних конструкціях. Шляхом безперервного моніторингу балок у вологому та сухому середовищах вдалося ідентифікувати початок корозійного процесу та

утворення відповідних тріщин у бетоні. Результати аналізу параметрів АЕ були верифіковані за допомогою електронного зондового мікроаналізатора (EPMA). Отримані дані свідчать, що метод АЕ є перспективним інструментом для кількісної оцінки ранніх стадій корозії.

Наукове дослідження [13] зосереджене на кількісній оцінці невизначеностей при аналізі надійності корозійно-пошкоджених конструкцій. Автори застосували методи стохастичного моделювання для врахування розкиду експериментальних даних. Показано, що ігнорування невизначеностей може призводити до неконсервативних оцінок ресурсу. Запропоновано підхід до калібрування коефіцієнтів безпеки з урахуванням статистичних даних.

Дослідження [14] фокусується на оцінці довговічності несучої конструкції відкритого вантажного вагона з круглих труб під час транспортування на залізничному паромі. Автори використали методи скінченних елементів для аналізу напружень, викликаних хитами. Результати показали, що конструкція з круглих труб має достатню міцність, але потребує додаткового кріплення для зменшення динамічних навантажень. Робота має важливе значення для забезпечення безпеки перевезень.

У статті [15] розроблено ймовірнісну модель прогнозування корозійної деградації несучих систем. Особливістю роботи є врахування впливу експлуатаційних факторів (клімат, інтенсивність використання). Модель дозволяє прогнозувати розподіл корозійних пошкоджень у часі з заданою ймовірністю. Результати можуть бути використані для оптимізації графіків технічного обслуговування.

У статті [16] досліджується вплив в'язкого зв'язку на динамічні навантаження напіввагона під час його кріплення до палуби парома. Автори провели експериментальні та чисельні дослідження, які показали, що використання в'язкого зв'язку дозволяє значно знизити динамічні навантаження. Це особливо важливо для запобігання пошкодженням вантажу та конструкції вагона. Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення методів кріплення рухомого складу на паромі.

Дослідження [17] присвячене оптимізації систем захисту від корозії на основі критеріїв надійності. Автори розробили методологію вибору оптимальних матеріалів покриттів з урахуванням вартісних обмежень. Показано, що правильний вибір захисту може збільшити ресурс конструкцій на 30-50%. Результати мають важливе практичне значення для виробництва транспортних засобів.

У роботі [18] досліджено вплив корозійних дефектів на втомну міцність рам. Автори провели комплексні випробування на втому зразків з штучно створеними корозійними дефектами. Встановлено, що навіть невеликі поверхневі пошкодження можуть знизити втомний ресурс у 2-3 рази. Запропоновано модифіковані криві втоми для корозійно-пошкоджених матеріалів.

Стаття [19] пропонує інтегрований підхід до оцінки надійності, який поєднує аналіз корозійної деградації з розрахунком динамічних характеристик. Автори розробили комплексну модель, що враховує взаємодію корозії, вібрацій і ударних навантажень. Показано, що динамічні ефекти можуть прискорювати розвиток корозійно-втомних тріщин. Методика дозволяє точніше прогнозувати залишковий ресурс конструкцій.

В роботі [20] викладена методика виявлення типових несправностей і величин корозійного зносу. Ущерб от коррозии в СНГ: ~2% от стоимости парка ежегодно.

В роботі [21] виконано аналіз парку вантажних вагонів, які вичерпали свій первісний ресурс на території України та країн СНД. Показано несправності вантажних вагонів, принцип проведення та методи технічного діагностування з використанням оцінки технічного стану вантажних вагонів.

Аналіз літератури чітко засвідчив, що питанню визначення методичних основ моделювання та оцінки надійності несучих систем транспортних засобів з урахуванням їх корозійної деградації не приділено достатньої уваги. Попри очевидну актуальність проблеми корозії, яка значно впливає на термін служби та безпеку експлуатації, існуючі наукові дослідження не повною мірою охоплюють комплексний підхід до цієї теми. Це створює суттєвий пробіл у розумінні динаміки деградації матеріалів та її впливу на несучі конструкції. Відсутність системних методик ускладнює точне прогнозування залишкового ресурсу та розробку ефективних стратегій обслуговування. Отже, існує нагальна потреба в поглиблених дослідженнях, спрямованих на розробку комплексних моделей, що інтегруватимуть фактори корозійної деградації. Це дозволить підвищити надійність та безпеку транспортних засобів протягом усього їхнього життєвого циклу.

Методи та методики дослідження. У дослідженні були застосовані методи системного аналізу для вивчення складної взаємодії між надійністю несучих систем, корозійною деградацією та умовами експлуатації транспортних засобів. Для кількісної оцінки впливу корозії на несучі елементи було використано методи

статистичного аналізу даних про відмови та пошкодження, зібраних в реальних умовах експлуатації. Розробка математичних моделей надійності здійснювалася за допомогою методів теорії ймовірностей та математичної статистики, що дозволило прогнозувати ресурс елементів з урахуванням стохастичного характеру корозійних процесів. Методи комп'ютерного моделювання, зокрема метод скінченних елементів, використовувалися для імітації поведінки конструкцій та розрахунку напружено-деформованого стану з урахуванням зменшення товщини матеріалу через корозію.

Методики експериментального дослідження, включаючи випробування на корозійну стійкість та навантаження, були проведені для верифікації розроблених моделей та уточнення їх параметрів. Для комплексної оцінки надійності та прийняття рішень щодо ремонту або заміни елементів застосовувалися методи багатокритеріальної оптимізації, що враховують як технічні, так і економічні аспекти.

Метою науково-прикладного дослідження є розробка методичних основ для моделювання та оцінки надійності несучих систем транспортних засобів, беручи до уваги їх корозійну деградацію. Дослідження спрямоване на створення інструментарію, який дозволить прогнозувати зміну надійності під впливом корозії та оптимізувати термін служби транспортних засобів. Отримані результати сприятимуть підвищенню безпеки експлуатації та ефективності використання транспортних засобів.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні задачі:

- проаналізувати та узагальнити наявні методики моделювання та оцінки надійності несучих систем транспортних засобів, акцентуючи увагу на підходах до врахування корозійної деградації;
- розробити математичні моделі корозійної деградації матеріалів несучих систем, що враховують вплив експлуатаційних факторів та часові характеристики розвитку корозії;
- сформулювати методичні основи інтеграції моделей корозійної деградації в загальні моделі надійності несучих систем транспортних засобів;
- розробити алгоритми та програмне забезпечення для чисельної реалізації запропонованих методичних основ моделювання та оцінки надійності;
- провести експериментальні дослідження для верифікації розроблених моделей та методик, використовуючи зразки матеріалів та елементів несучих систем;

– визначити ключові параметри, що впливають на надійність несучих систем з урахуванням корозійної деградації, та розробити рекомендації щодо їх оптимізації;

– сформулювати практичні рекомендації щодо підвищення надійності несучих систем транспортних засобів шляхом впровадження запропонованих методичних основ у процес проектування та експлуатації.

Об'єктом дослідження є несучі системи транспортних засобів, які зазнають впливу корозійної деградації.

Предметом дослідження є методичні основи моделювання та оцінки надійності цих систем, з особливим акцентом на інтеграції чинника корозійної деградації.

Результати та дискусії. Прогнозування залишкового ресурсу несучих елементів транспортних засобів (рам вантажних вагонів, шворневих балок, елементів кузова) вимагає переходу від якісних оцінок до кількісних моделей, що інтегрують механіку руйнування та кінетику корозійних процесів. Основним параметром, що визначає міцність тонкостінних конструкцій, є товщина стінки елемента. Корозія призводить до її системного зменшення, що можна описати детерміновано або стохастично.

Надійність та довговічність несучої системи транспортного засобу (ТЗ) в процесі експлуатації значною мірою детерміновані процесами корозійно-механічного зношування. Згідно з даними діагностики технічного стану, до 95% вузлів, що працюють в умовах агресивних середовищ, схильні до корозійного руйнування [22]. Це обумовлює актуальність розробки детерміновано-ймовірнісних моделей оцінки залишкового ресурсу з урахуванням показника корозійної стійкості матеріалу та дає можливість переходу від концепції регламентованих ремонтів до стратегії технічного обслуговування за станом [23].

Для кількісної оцінки корозійних факторів руйнування несівних елементів кузова напіввагону було проведено розрахункові дослідження напружено-деформованого стану їх несучих конструкцій методом кінцевих елементів, у комп'ютерному пакеті моделювання SolidWorks. Побудовану кінцево-елементну 3D-модель наведено на рисунку 1 з урахуванням отриманих даних корозійного зносу, елементів вантажних вагонів отриманих в статті [2].

Методика оцінки корозійного зносу на основі показника стійкості

Основним параметром, що кількісно характеризує деградацію, є зменшення розрахункової товщини стінки елемента. У роботі запропоновано комплексний підхід, що базується на визначенні

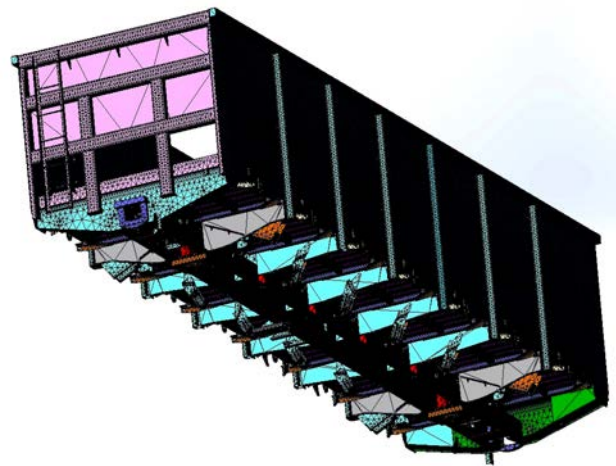


Рис. 1. Модель кузова напіввагона з урахуванням отриманих даних корозійного зносу елементів

коефіцієнта корозійної стійкості q_k , який інтегрує вплив різних видів корозії та умов експлуатації.

Залежність товщини металу від терміну служби гондольних вагонів була отримана шляхом апроксимації лінійною моделлю (рівномірна корозія) (1) та параболічною моделлю (при окисленні) з використанням методу найменших квадратів (МНК). [2,22,23]:

$$L_{(kmp)} = b_0 - f \cdot t_i, \quad (1)$$

$$L_{(kmp)oks} = b_0 - f \cdot \sqrt{t_i} \quad (2)$$

Початкова (проектна) товщина формується з урахуванням корозійного припуску:

$$L_n = L_p + C_{oi} + C_k, C_{oi} = T_s \cdot V_k \quad (3)$$

де C_{oi} – припуск на корозію, T_s – призначений строк служби, V_k – швидкість корозії, C_k – конструктивний припуск.

Кількісні показники різних видів корозії Для кількісної оцінки деградації запропоновано набір показників, які визначаються за стандартизованими методиками [24,25]:

Втрата маси на одиницю площі при суцільній корозії:

$$\Delta m = \frac{m_0 - m_1}{F} \quad (4)$$

Зміна товщини: $\Delta L = \Delta m / \rho$

Ступінь ураження поверхні плямами корозії:

$$G = (\sum F_i / F) \cdot 100\% \quad (5)$$

Лінійна швидкість корозії: $V_i = \Delta L_i / \tau_i$

Інтегральним показником, що враховує комбінацію факторів, є коефіцієнт корозійної стійкості:

$$q_k = f(\Delta m_i, \Delta L_i, \Delta H_i, G, L_i, \tau_{mi}, \tau_i) \quad (6)$$

Моделювання зміни запасів товщини та міцності Нормативний запас товщини на момент досягнення граничного стану:

$$n_{st}^s = L_p / L_{min} = 1.5. \quad (7)$$

Фактичний запас товщини на момент k -го технічного діагностування (ТД) з урахуванням деградації:

$$n_k^s = q_k \cdot \frac{L}{L_{min}} \quad (8)$$

Коефіцієнт безпеки (запас на знос), що показує допустиму подальшу деградацію:

$$K_k^s = \frac{n_k^s}{n_i^s - n_k^s} \quad (10)$$

Оцінка впливу корозії на запас товщини елементів вагону. На основі запропонованої методики проведено розрахунки зміни запасу товщини стінки рами ТЗ при прогресуючій корозії дані наведено в таблиці 1.

Аналіз даних показує, що зі зменшенням товщини Z профілю хребтової балки на відносно номіналу, запас міцності падає непропорційно швидше, особливо при погіршенні корозійної стійкості ($q_k = 0.8$). Це підкреслює важливість регулярного моніторингу стану та фактора q_k . В якості прикладу наведен графік розрахунку запасів товщини Z профілю, хребтової балки при її зменшенні наведено на рисунку 2.

Прогнозування ресурсу на основі комплексного критерію Для практичного прогнозування залишкового ресурсу (T_k^s) запропоновано модель, що інтегрує стан матеріалу, результати діагностики та потенційний ризик:

$$T_k^s = \sqrt{W_k \cdot \beta_k \cdot \left(q_k \cdot \frac{n_k^s}{n_i^s - n_k^s} \right)^2} \quad (11)$$

де W_k – ефективний обсяг ТД,
 β_k – коефіцієнт дефектності,
 n_i^s – початковий запас товщини.

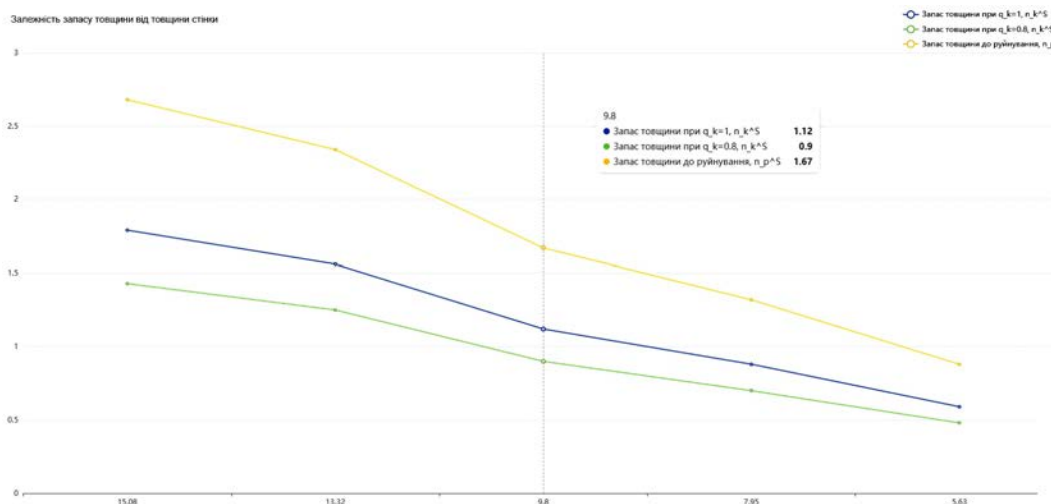


Рис. 2. Розрахунок запасів товщини Z профілю хребтової балки при її зменшенні

Таблиця 1

Розрахунок запасів товщини стінки Z профілю хребтової балки при її зменшенні

Товщина стінки L_k , мм	15,08	13,32	9,8	7,95	5,63
Запас товщини при $q_k = 1$, n_k^s	1,79	1,56	1,12	0,88	0,59
Запас товщини при $q_k = 0,8$, n_k^s	1,43	1,25	0,90	0,70	0,48
Запас товщини до руйнування, n_p^s	2,68	2,34	1,67	1,32	0,88

Таблиця 2

Розбиття основних параметрів ресурсу Z профілю хребтової балки на етапах життєвого циклу

Ресурс	Товщина, мм	Запас товщини	Запас міцності
Проектний T_n	14,0	2,17	1,50
Початковий T_0	14,0	2,17	1,50
Поточний T_k	9,4	1,42	1,27
Залишковий $T_{ост}$	6,95	1,17	1,17

В якості прикладу наведено графік прогнозування ресурсу Z профілю хребтової балки на основі комплексного критерію рис. 3.

Урахування категорії небезпеки при прогнозуванні ресурсу Для обґрунтування міжремонтних інтервалів розроблено модель, що дозволяє будувати залежності залишкового ресурсу для обладнання різних груп небезпеки. Вихідні дані для побудови таких залежностей представлені в таблиці 3.

Графіка залежності залишкового ресурсу хребтової балки від поточного запасу міцності рисунок 4.

Результати та дискусії. Надійність транспортних засобів є критично важливим фактором для забезпечення безпеки перевезень та ефективності експлуатації. Несучі системи, що є основними конструктивними елементами, що сприймають навантаження, відіграють ключову роль у цій надійності. Однак, з плином часу, ці

системи піддаються різним видам деградації, серед яких корозія є однією з найбільш руйнівних та поширених. Вплив корозійної деградації на несучі системи транспортних засобів залишається недостатньо вивченим і врахованим у сучасних методиках моделювання та оцінки надійності. Існуючі моделі часто не повною мірою відображають складність взаємодії між механічними навантаженнями та корозійними процесами, що призводить до неточної оцінки залишкового ресурсу та підвищених ризиків експлуатації.

Відсутність комплексних методичних основ, що дозволяють інтегрувати дані про корозійну деградацію в моделі надійності, ускладнює прогнозування технічного стану транспортних засобів. Це створює серйозні виклики для розробників, виробників та експлуатаційних організацій, оскільки непередбачувані відмови через корозійне пошкодження можуть призвести до

Таблиця 3

Дані для побудови графіка залежності залишкового ресурсу хребтової балки від поточного запасу міцності.

Поточний запас міцності, η_k	Група небезпеки 1, T_k^s	Група небезпеки 2, T_k^s	Група небезпеки 3, T_k^s	Група небезпеки 4, T_k^s
1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.1	0.65	0.58	0.52	0.48
1.2	0.92	0.82	0.74	0.68
1.5	1.50	1.33	1.20	1.11
2.0	2.00	1.78	1.60	1.48
2.1	2.06	1.83	1.65	1.52

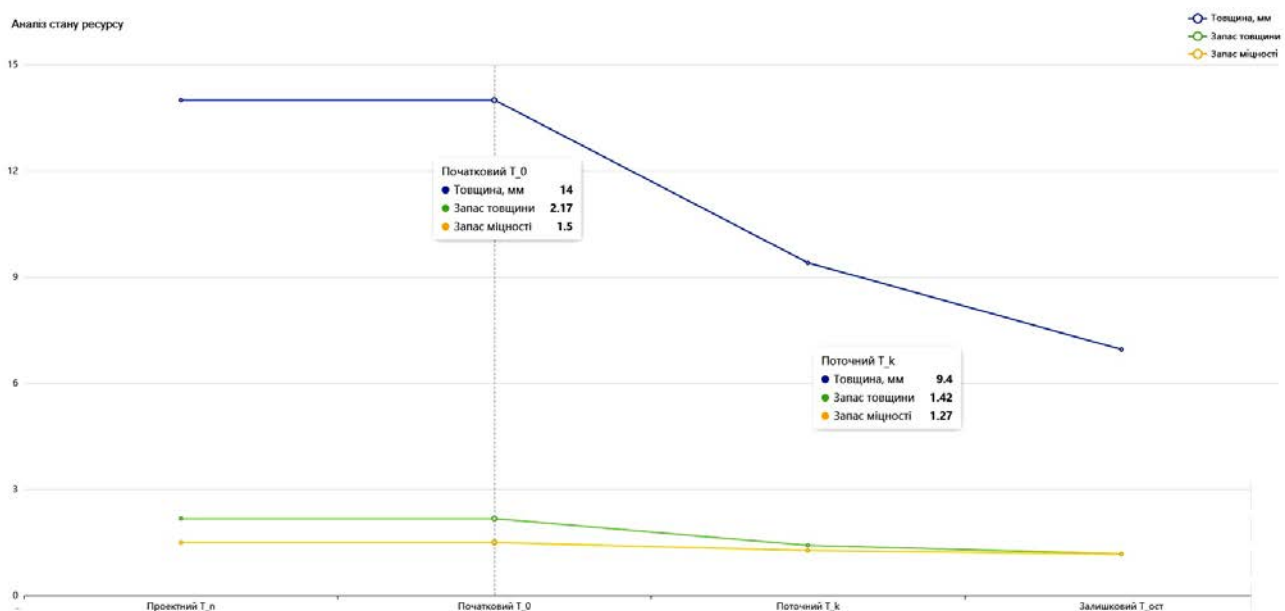


Рис. 3. Прогнозування ресурсу Z профілю хребтової балки на основі комплексного критерію

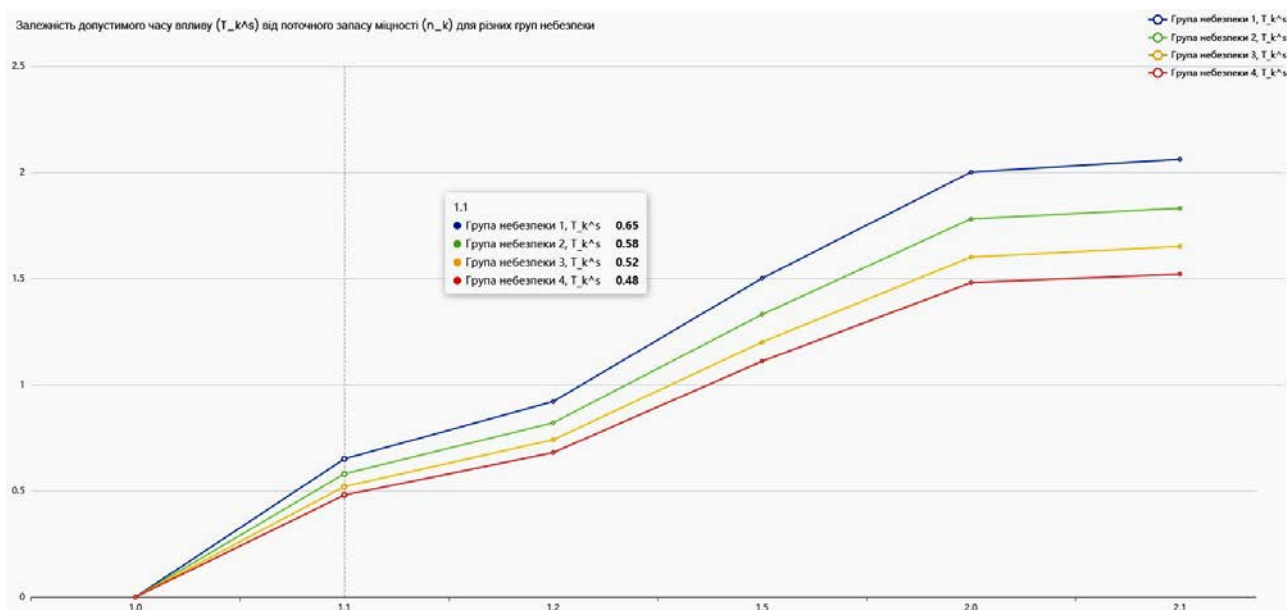


Рис. 4. Графік залежності залишкового ресурсу хребтової балки від поточного запасу міцності

значних фінансових втрат, затримок у перевезеннях та, що найважливіше, до аварій. Необхідність розробки нових підходів, що враховують динаміку корозійних процесів та їх вплив на міцність і жорсткість несучих елементів, стає очевидною. Поточні методики оцінки надійності часто базуються на ідеалізованих умовах, не беручи до уваги реальні експлуатаційні фактори, що прискорюють корозію, такі як вплив агресивних середовищ, коливання температур та механічні пошкодження захисних покриттів. Тому, розробка обґрунтованих методичних основ моделювання та оцінки надійності несучих систем транспортних засобів, що інтегрують аспекти їх корозійної деградації, є важливим науково-прикладним завданням.

Висновки. Розроблена методична база дозволяє інтегрувати фактор корозійної деградації безпосередньо в моделі оцінки надійності несучих систем транспортних засобів, що істотно підвищує адекватність прогнозів.

Запропоновані моделі враховують зміни механічних характеристик матеріалів внаслідок корозійного пошкодження, що дає змогу точніше прогнозувати їхній залишковий ресурс.

Встановлено, що ігнорування корозії призводить до значної переоцінки терміну безвідмовної роботи несучих систем, що може мати критичні наслідки для безпеки експлуатації.

Визначено ключові параметри корозійного впливу (наприклад, швидкість корозії, тип середовища, концентрація агресивних компонентів), які є визначальними для розрахунку зниження несучої здатності.

Розроблений підхід дозволяє проводити оптимізацію матеріалів та конструктивних рішень з метою підвищення корозійної стійкості та, відповідно, загальної надійності транспортних засобів.

Впровадження запропонованих методик дасть змогу здійснювати ефективніше планування технічного обслуговування та ремонту, ґрунтуючись на реальному стані несучих елементів.

Побудовані прогностичні моделі дозволяють оцінювати вплив різних видів корозії (рівномірної, пітингової, міжкристалічної) на показники надійності, що є важливим для диференційованого підходу до захисту.

Обґрунтовано необхідність безперервного моніторингу корозійного стану критичних елементів несучих систем для своєчасного виявлення деградаційних процесів.

Запропоновано методику оцінки залишкового ресурсу несучої системи ТЗ, яка ґрунтується на використанні динамічного показника корозійної стійкості матеріалу $\ll Eqn039.eps \gg$, що дозволяє більш адекватно враховувати реальну деградацію в умовах експлуатації.

Розроблені розрахункові залежності та модель дозволяють прогнозувати ресурс як функцію від поточного запасу міцності, результатів технічного діагностування та категорії ризику обладнання.

Запропонований підхід створює основу для переходу від планово-попереджувальної системи ремонтів до системи технічного обслуговування за фактичним технічним станом, що може суттєво підвищити економічну ефективність експлуатації ТЗ та зменшити ризики аварійних відмов.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Про Національну транспортну стратегію України на період до 2030 року : постанова Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2024 р. № 1550. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF#n17> (дата звернення: 03.03.2025).
2. Fomin O. V., Burlutskiy O. V., Kulbovskiy I. I., Veremeienko L. A. Modelling and prevention of corrosion in load-bearing elements of freight cars. *Municipal Economy of Cities. Series: Technical Sciences and Architecture*. 2025. 3(191). 597–605. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-3-191-597-605>
3. Chenxing Cui, Li Song, Jinliang Liu and Zhiwu Yu ,Corrosion-Fatigue Life Prediction Modeling for RC Structures under CoupledCarbonation and Repeated Loading. *Mathematics* 2021. 9(24). 3296. <https://doi.org/10.3390/math9243296>
4. Hrabová K., Lehner P., Ghosh P., Konečný P., Teplý B., Sustainability Levels in Comparison with Mechanical Properties and Durability of Pumice High-Performance Concrete. *Appl. Sci.* 2021. 11. 4964. <https://doi.org/10.3390/app11114964>
5. Qiang Li, Jintao Lan, Lu Shen, Jiping Yang, Chong Chen, Zhilu Jiang, Chao Wang. A state-of-the-art review on monitoring technology and characterization of reinforcement corrosion in concrete Case Studies in Construction Materials. Vol. 22. July 2025, e04780 <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04780>
6. Jin G., Jiang Y., Tian Y., et al. Design and application of MCD steel reinforcement corrosion detection apparatus, *J. Build. Mater.*, 23 (03) (2020), pp. 733-738 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-9629.2020.03.035>
7. A. O. Sulym, O. V. Fomin, P. O. Khozia, A. G. Mastepan , Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the rolling stock, *Scientific Bulletin of the National Mining University*. 2018. № 5. С. 79–87. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
8. Wang Y., Zhang P., Qin G. Reliability assessment of pitting corrosion of pipeline under spatiotemporal earthquake including spatial-dependent corrosion growth. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021. Vol. 148. P. 166–178. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.10.005>
9. Fomin O., Sulym A., Kulbovsky I., Khozia P., Ishchenko V. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 2. № 1. P. 63–71. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080>.
10. Ferrarotti A., Ghiggini E.V., Rocca R. et al. Simulation of corrosion phenomena in automotive components: a case study. *Materials*. 2023. Vol. 16. № 15. P. 5368. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16155368>
11. Tran L., Nguyen T.-H. Effect of Metal Corrosion on the Structural Reliability of the 3D Steel Frames. *Advances in Engineering Research and Application. Proceedings of the International Conference on Engineering Research and Applications, ICERA 2020* : матеріали конф. 2021. P. 39–44. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-0053-1_5
12. Kawasaki Y., Shiotani T., Ohtsu M. Corrosion mechanisms in reinforced concrete by acoustic emission. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 48. P. 1240–1247. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.020>
13. Luo Y., Zhang C., Liu J. Identifying ship-wakes in a shallow estuary using machine learning. *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 245. P. 110456. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110456>
14. Fomin O. et al. Durability Determination of the Bearing Structure of an Open Freight Wagon Body Made of Round Pipes during its Transportation on the Railway Ferry. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*. 2019. Vol. 21. № 1. P. 28–34. <https://doi.org/10.26552/com.C.2019.1.28-34>
15. Melchers R.E. Mathematical modelling of the diffusion phase of marine corrosion. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 2003. Vol. 125. № 4. P. 264–271. <https://doi.org/10.1115/1.1600467>
16. Фомін О., Ловська А., Кульбовський І., Голуб Г., Козарчук І., Харута В. Визначення динамічного навантаження на піввагон при його кріпленні в'язким з'єднанням до палуби парома. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2019. № 2. С. 6–12. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160456>
17. Wang J., Zhang R. Reliability-Based Optimization Design of Variable Cross-Section Component. *Corrosion Science*. 2020. Vol. 174. P. 108840. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108840>.
18. Qu C.-X., Jiang J.-Z., Yi T.-H., Li H.-N. Computer vision-based 3D coordinate acquisition of surface feature points of building structures. *Engineering Structures*. 2024. Vol. 300. P. 117212. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117212>
19. Sadeghian M. The Reliability Assessment of a Ship Structure under Corrosion and Fatigue, using Structural Health Monitoring. *International Journal of Engineering*. 2022. Vol. 35. № 9C. P. 1765–1778. <https://doi.org/10.5829/IJE.2022.35.09C.13>
20. Анофрієв В. Г., Донєв О. А., Мацюк А. С., Оберняк С. М. Аналіз виникнення несправностей та зносу елементів шворневої балки піввагона. *Вісник Дніпропетровського національного університету заліз-*

ничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2012. Вип. 41. С. 7–10. DOI: <https://crust.ust.edu.ua/server/api/core/bitstreams/0a889730-e131-4ee4-8a3f-1250c615c159/content>

21. Сапронова С. Ю., Буліч Д. І., Ткаченко В. П. Продовження терміну експлуатації вантажних вагонів. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2017. № 3. С. 179–182.

22. Пухлій В. М., Шевченко О. А. Діагностика технічного стану та прогнозування залишкового ресурсу металевих конструкцій транспортних засобів. Київ : НТУ, 2018. 210 с.

23. Коваленко В. С., Білоног О. М. Стратегії технічного обслуговування та ремонту машин на засадах надійності. *Вісник Національного транспортного університету*. 2020. Вип. 45. С. 124–130.

24. ДСТУ ISO 9223:2017. Корозія металів і сплавів. Агресивність атмосфер. Класифікація, визначення та оцінка. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 24 с.

25. Мельник Р. Ф., Захарченко В. Г. Надійність і довговічність машинобудівних конструкцій в умовах корозійного впливу. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 185 с.

REFERENCES:

1. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2024, December 27). *National transport strategy of Ukraine for the period until 2030* [Natsionalna transportna stratehiia Ukrainy na period do 2030 roku] (Resolution No. 1550). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF#n17>

2. Fomin, O. V., Burlutskiy, O. V., Kulbovskiy, I. I., & Veremeienko, L. A. (2025). Metodichni osnovy modeliuvannia ta otsinky nadiinosti nesuchykh system transportnykh zasobiv z urakhuvanniam yikh korozijnoi dehradatsii [Methodological foundations of modelling and reliability assessment of load-bearing systems of transport vehicles, taking into account their corrosive degradation]. *Municipal Economy of Cities. Series: Technical Sciences and Architecture*, (3), 597–605. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-3-191-597-605> [in Ukrainian]

3. Cui, C., Song, L., Liu, J., & Yu, Z. (2021). Corrosion-fatigue life prediction modeling for RC structures under coupled carbonation and repeated loading. *Mathematics*, 9(24), 3296. <https://doi.org/10.3390/math9243296>

4. Hrabová, K., Lehner, P., Ghosh, P., Konečný, P., & Teplý, B. (2021). Sustainability levels in comparison with mechanical properties and durability of pumice high-performance concrete. *Applied Sciences*, 11 (11), Article 4964. <https://doi.org/10.3390/app11114964>

5. Li, Q., Lan, J., Shen, L., Yang, J., Chen, C., Jiang, Z., & Wang, C. (2025, July). A state-of-the-art review on monitoring technology and characterization of reinforcement corrosion in concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 22, e04780. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04780>

6. Jin, G., Jiang, Y., Tian, Y., et al. (2020). Design and application of MCD steel reinforcement corrosion detection apparatus. *Journal of Building Materials*, 23 (3), 733–738. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-9629.2020.03.035>

7. Sulim, A. O., Fomin, O. V., Khozya, P. O., & Mastepan, A. (2018). Teoretychne i praktychne vyznachennia parametriv bortovoi emnisnoi systemy nakopychennia enerhii pidzemnoi rukhomoho skladu [Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock]. *Scientific Bulletin of National Mining University*, (5), 79–87. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8> [in Ukrainian]

8. Wang, Y., Zhang, P., & Qin, G. (2021). Reliability assessment of pitting corrosion of pipeline under spatiotemporal earthquake including spatial-dependent corrosion growth. *Process Safety and Environmental Protection*, 148, 166–178. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.10.005>

9. Fomin, O., Sulym, A., Kulbovsky, I., Khozia, P., & Ishchenko, V. (2018). Vyznachennia ratsionalnykh parametriv emnisnoi systemy nakopychennia enerhii dlia pidzemnoi zaliznychnoi rukhomoho skladu [Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock]. *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii – Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (1), 63–71. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080> [in Ukrainian]

10. Ferrarotti, A., Ghiggin, E. V., Rocca, R., et al. (2023). Simulation of corrosion phenomena in automotive components: A case study. *Materials*, 16(15), Article 5368. <https://doi.org/10.3390/ma16155368>

11. Tran, L., & Nguyen, T.-H. (2021). Effect of metal corrosion on the structural reliability of the 3D steel frames. In S.-I. Ao, H. R. Karimi, & L. G. Baciú (Eds.), *Advances in Engineering Research and Application: Proceedings of the International Conference on Engineering Research and Applications, ICERA 2020* (pp. 39–44). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0053-1_5

12. Kawasaki, Y., Shiotani, T., & Ohtsu, M. (2013). Corrosion mechanisms in reinforced concrete by acoustic emission. *Construction and Building Materials*, 48, 1240–1247. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.020>

13. Luo, Y., Zhang, C., & Liu, J. (2022). Identifying ship-wakes in a shallow estuary using machine learning. *Ocean Engineering*, 245, 110456. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110456>

14. Fomin, O., Gerlici, J., Lovska, A., Kravchenko, K., Prokopenko, P., Fomina, A., & Hauser, V. (2019). Durability determination of the bearing structure of an open freight wagon body made of round pipes during its transportation on the railway ferry. *Communications - Scientific Letters of the University of Žilina*, 21 (1), 28–34. <https://doi.org/10.26552/com.C.2019.1.28-34>
15. Melchers, R. E. (2003). Mathematical modelling of the diffusion phase of marine corrosion. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 125(4), 264–271. <https://doi.org/10.1115/1.1600467>
16. Fomin, O., Lovska, A., Kulbovskiy, I., Holub, G., Kozarchuk, I., & Kharuta, V. (2019). Vyznachennia dynamichnoho navantazhennia na pivvahon pry yoho kriptleni v'iazkym z'iednanniam do paluby paroma [Determination of dynamic loading on a gondola car during its fastening by viscous connection to the ferry deck]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2, 6–12. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160456>
17. Wang, J., & Zhang, R. (2020). Reliability-Based Optimization Design of Variable Cross-Section Component. *Corrosion Science*, 174, 108840. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108840>
18. Qu, C.-X., Jiang, J.-Z., Yi, T.-H., & Li, H.-N. (2024). Computer vision-based 3D coordinate acquisition of surface feature points of building structures. *Engineering Structures*, 300, 117212. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117212>
19. Sadeghian, M. (2022). The reliability assessment of a ship structure under corrosion and fatigue, using structural health monitoring. *International Journal of Engineering*, 35(9C), 1765–1778. <https://doi.org/10.5829/IJE.2022.35.09C.13>
20. Anofriiev, V. H., Doniev, O. A., Matsiuk, A. S., & Obertniak, S. M. (2012). Analiz vynyknennia nespravnostei ta znosu elementiv shvornevoi balky pivvahona [Analysis of malfunctions and wear of the pivot beam elements of a gondola car]. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, (41), 7–10.
21. Saprionova, S. Yu., Bulich, D. I., & Tkachenko, V. P. (2017). Prodovzhennia terminu ekspluatatsii vantazhnykh vahoniv [Extension of the service life of freight cars]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia*, (3), 179–182.
22. Pukhlyi, V. M., & Shevchenko, O. A. (2018). Diahnostyka tekhnichnoho stanu ta prohnozuvannia zalyshkovoho resursu metalovykh konstruksii transportnykh zasobiv [Diagnostics of the technical condition and forecasting of the residual resource of metal structures of vehicles]. NTU. K. 210 c. [in Ukrainian]
23. Kovalenko, V. S., & Bilonoh, O. M. (2020). Stratehii tekhnichnoho obsluhovuvannia ta remontu mashyn na zasadakh nadiinosti [Strategies for maintenance and repair of machines based on reliability]. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu*, (45), 124–130. [in Ukrainian]
24. DSTU ISO 9223:2017. (2017). Koroziiia metaliv i splaviv. Ahresyvnyist atmosfer. Klasyfikatsiia, vyznachennia ta otsinka [Corrosion of metals and alloys. Corrosivity of atmospheres. Classification, determination and assessment]. DP «UkrNDNTs». [in Ukrainian]
25. Melnyk, R. F., & Zakharchenko, V. H. (2019). Nadiinist i dovhovichnist mashynobudivnykh konstruksii v umovakh koroziiinoho vplyvu [Reliability and durability of mechanical engineering structures under corrosive conditions]. KhNUMH im. O. M. Beketova. 185 c. [in Ukrainian].



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 30.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.01.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026