

УДК 629.5.015.5

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2026.2\(505\).29](https://doi.org/10.15589/znп2026.2(505).29)**RENOVATION OF PORT HANDLING EQUIPMENT AS A METHOD
FOR EXTENDING THE SERVICE LIFE OF METAL STRUCTURES****РЕНОВАЦІЯ ПОРТОВОГО ПЕРЕВАНТАЖУВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ
ЯК СПОСІБ ПОДОВЖЕННЯ ТЕРМІНУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ
МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЇ**

Iryna P. Lehetska
ilegetska@gmail.com
ORCID: 0000-0002-0858-0770

І. П. Леґецька,
доктор філософії, доцент

Odesa National Maritime University, Odesa
Одеський національний морський університет, м. Одеса

Abstract. The paper is devoted to the study of issues related to ensuring the reliable operation of port cargo-handling cranes operating under conditions of long-term service and increased load intensity. The operational features of crane steel structures in marine terminal environments are considered, characterized by variable dynamic loads, cyclic operating modes, and the influence of aggressive corrosive factors. Modern approaches to assessing the technical condition of lifting and transport equipment are analyzed, as well as current trends in transitioning from operation based on normative service life toward life-cycle management of machines based on the actual condition of structures. The study summarizes information on typical operational damage to the metal structures of port cranes, including the development of fatigue cracks in welded joints, corrosion-induced reduction of structural cross-sections, and the accumulation of local defects in stress concentration zones. The causes of accident situations associated with the degradation of load-bearing units are examined, along with engineering aspects of evaluating changes in their load-carrying capacity during long-term operation.

Particular attention is given to the renovation of port cargo-handling equipment as a component of technical condition management and life-cycle extension of machinery. Approaches to engineering decision-making regarding modernization and restoration of metal structures are outlined, taking into account fatigue degradation processes and corrosion wear. The role of diagnostics, damage analysis, and performance degradation forecasting within the system of technical support for equipment operation is highlighted.

The materials of the study are aimed at forming a comprehensive understanding of the technical condition of port cranes during long-term operation and substantiating the necessity of a systematic approach to their renewal and the maintenance of operational safety.

Purpose. To develop an approach for the renovation of port container handling equipment as a tool for managing the residual life of metal structures throughout the machines' life cycle.

Method. The concept of technical condition as a dynamic parameter was applied, using diagnostic control methods, analytical assessment of material degradation, and forecasting changes in the load-bearing capacity of structures during operation.

Results. A model was developed linking the nature of operational damage to metal structures with the effectiveness of renovation interventions, enabling management of service life extension through targeted modernization of structural elements.

Scientific novelty. A systematic approach to the renovation of port machinery is proposed as an integral part of life-cycle management, based on predictive assessment of the residual strength of metal structures.

Practical importance. The results can be used to develop technical development programs for port equipment, taking into account resource efficiency and improvement of operational reliability.

Key words: environmental safety; risk; water area; pollution; human impact.

Анотація. Робота присвячена дослідженню проблем забезпечення надійної експлуатації портів перевантажувальних кранів, що працюють в умовах тривалої служби та підвищеної інтенсивності навантажень. Розглянуто особливості функціонування металоконструкцій кранів у середовищі морських терміналів, для якого характерні змінні динамічні навантаження, циклічний характер роботи та вплив агресивних корозійних факторів. Проаналізовано сучасні підходи до оцінювання технічного стану підйомно-транспортного обладнання та тенденції переходу від експлуатації за нормативним строком служби до управління життєвим циклом машин на основі фактичного стану конструкцій.

У роботі узагальнено відомості щодо характерних експлуатаційних пошкоджень металоконструкцій портових кранів, зокрема розвитку втомних тріщин у зварних з'єднаннях, корозійного зменшення перерізів елементів і накопичення локальних дефектів у зонах концентрації напружень. Розглянуто причини виникнення аварійних ситуацій, пов'язаних із деградацією несучих вузлів, а також інженерні аспекти оцінювання зміни їхньої несучої здатності в процесі довготривалої експлуатації.

Особливу увагу приділено розгляду реновації портового перевантажувального обладнання як складової управління технічним станом і подовження життєвого циклу машин. Висвітлено підходи до прийняття інженерних рішень щодо модернізації та відновлення металоконструкцій з урахуванням процесів втомної деградації та корозійного зношення. Показано місце діагностування, аналізу пошкоджень і прогнозування зміни працездатності конструкцій у системі технічного супроводу обладнання.

Матеріали роботи орієнтовані на формування комплексного уявлення про технічний стан портових кранів у тривалій експлуатації та обґрунтування необхідності системного підходу до їх оновлення й підтримання експлуатаційної безпеки.

Мета. Формування підходу до реновації портового перевантажувального обладнання як інструменту управління залишковим ресурсом металоконструкцій упродовж життєвого циклу машин.

Методика. Застосовано концепцію технічного стану як динамічного параметра з використанням діагностичних методів контролю, аналітичного оцінювання деградації матеріалу та прогнозування зміни несучої здатності конструкцій у процесі експлуатації.

Результати. Розроблено модель взаємозв'язку між характером експлуатаційних пошкоджень металоконструкцій і ефективністю реноваційних втручань, що дозволяє керувати подовженням строку служби обладнання шляхом цілеспрямованої модернізації конструктивних елементів.

Наукова новизна. Запропоновано системний підхід до реновації портових машин як складової управління їхнім життєвим циклом на основі прогнозової оцінки залишкової міцності металоконструкцій.

Практична значимість. Результати можуть бути використані для розроблення програм технічного розвитку портового обладнання з урахуванням ресурсоощадності та підвищення експлуатаційної надійності.

Ключові слова: реновація; портове обладнання; життєвий цикл, технічний стан, залишковий ресурс, деградація металоконструкцій.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Портові перевантажувальні крани є ключовими елементами транспортно-логістичної інфраструктури, що забезпечують безперервність вантажних потоків у морських терміналах. У сучасних портах обладнання експлуатується в умовах високої інтенсивності робочих циклів, змінних динамічних навантажень та агресивного морського середовища, що призводить до прискореної деградації металоконструкцій. Дослідження іноземних науковців свідчать, що основними механізмами втрати працездатності портових кранів є втомне руйнування елементів несучих конструкцій, корозійне зменшення перерізів та накопичення мікропошкоджень у зонах концентрації напружень.

У роботах європейських та азійських дослідницьких груп розглядається концепція управління технічним станом підйомно-транспортного обладнання на основі оцінки залишкового ресурсу та прогнозування деградаційних процесів. Показано, що традиційні підходи, засновані на нормативному строку служби або періодичних ремонтах, не забезпечують достатнього рівня надійності в умовах інтенсивної експлуатації сучасних портів. Натомість усе більшого поширення набувають стратегії продовження життєвого циклу машин шляхом технічно обґрунтованої реновації металоконструкцій.

Разом із тим більшість наявних досліджень зосереджені на окремих аспектах деградації конструкцій

або методах діагностування без формування цілісної системи прийняття інженерних рішень щодо реновації портового обладнання. Недостатньо розкрито взаємозв'язок між характером експлуатаційних пошкоджень кранів, зміною їхньої несучої здатності та ефективністю реноваційних заходів у контексті управління життєвим циклом технічних систем.

У зв'язку з цим актуальною науково-технічною задачею є розроблення підходу до реновації портових перевантажувальних кранів на основі комплексної оцінки технічного стану металоконструкцій з урахуванням процесів втомної деградації та корозійного зношення. Розв'язання цієї задачі дозволить забезпечити подовження експлуатаційного ресурсу обладнання, підвищення рівня безпеки роботи портових терміналів та оптимізацію витрат на оновлення технічної інфраструктури.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Сучасні інженерні дослідження підтверджують, що аналіз технічного стану металоконструкцій кранів та прогнозування їх залишкового ресурсу є ключовою складовою забезпечення безпеки й надійності експлуатації. У численних роботах розглядаються методи оцінки втомної довговічності сталевих елементів мостових кранів та подібних конструкцій. Наприклад, якісну основу оцінювання залишкового ресурсу

металоконструкцій мостових кранів побудовано на основі теорії розповсюдження втомних тріщин із використанням FEM-моделювання та методів прогнозування напружено-деформованого стану [1]. У подібному дослідженні розроблено рамковий підхід до оцінювання залишкового втомного ресурсу експлуатованих металоконструкцій кранів із включенням корозійних дефектів і аналізом напружень у зварних з'єднаннях [2].

Науковці також розглядають питання кількісного прогнозування залишкової втомної довговічності мостових кранів на основі комбінації методів механіки пошкоджень, локальних напружень і методів розрахунку тріщиноутворення [3]. Останнє дослідження китайських спеціалістів демонструє, як сучасні методи прогнозування та тестування можуть бути використані для оцінки залишкового ресурсу мостових кранів у реальних експлуатаційних умовах із урахуванням початкових дефектів та накопичення пошкоджень [4]. Крім того, у дослідженнях показано, що дані про втомну деградацію основних балок і елементів кранів у довготривалій службі створюють основу для інженерних моделей прогнозу життєвого циклу обладнання [5].

Також сучасні підходи включають використання технологій Інтернету речей (IoT) для автоматичного збору даних про робочі цикли та напруження в реальному часі, що сприяє більш точному оцінюванню та прогнозуванню залишкового ресурсу [6]. Разом ці результати міжнародних досліджень підкреслюють, що оцінка технічного стану металоконструкцій кранів має стати комплексним, багаторівневим процесом – від діагностики та вимірювань навантажень до прогнозування деградації та моделювання подальшого розвитку пошкоджень.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Аналіз сучасних наукових досліджень свідчить, що більшість робіт іноземних авторів спрямовані на оцінювання втомної довговічності окремих елементів кранів, прогнозування розвитку тріщин та визначення залишкового ресурсу металоконструкцій. Разом із тим ці підходи здебільшого розглядають деградацію конструкцій як ізольований процес без інтеграції результатів діагностування у систему прийняття інженерних рішень щодо подовження життєвого циклу обладнання.

Недостатньо дослідженим залишається питання реновації портів перевантажувальних кранів як керованого процесу відновлення та модернізації металоконструкцій на основі комплексної оцінки технічного стану та залишкової міцності. Відсутні узагальнені підходи, що поєднують результати діагностики, прогнозування деградації матеріалу та вибір оптимальних реноваційних заходів у межах концепції управління життєвим циклом технічних систем.

Таким чином, актуальною залишається наукова задача формування системного підходу до реновації

портів обладнання, що базується на кількісній оцінці змін технічного стану металоконструкцій у процесі довготривалої експлуатації.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є створення науково обґрунтованої концепції реновації портів кранів із використанням оцінки технічного стану та ризиків деградації металоконструкцій для подовження експлуатаційного ресурсу обладнання.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є металоконструкції портів перевантажувальних кранів, що експлуатуються в умовах інтенсивних циклічних навантажень і впливу агресивного морського середовища.

Предметом дослідження є процеси деградації матеріалу металоконструкцій, зокрема втомне пошкодження, корозійне зношення та їхній вплив на зміну несучої здатності й залишкового ресурсу конструкцій.

У роботі застосовано методи технічного діагностування металоконструкцій, включаючи візуально-вимірювальний контроль і елементи неруйнівного контролю, аналітичні методи оцінювання напружено-деформованого стану та залишкової міцності елементів, а також підходи до прогнозування деградаційних процесів у межах концепції управління життєвим циклом технічних систем.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Портові перевантажувальні крани експлуатуються у складних умовах морських терміналів, де вони піддаються високочастотним циклічним навантажень і впливу агресивного середовища. Експлуатація у портах із високою інтенсивністю (до 100 робочих циклів на добу) призводить до накопичення втомних дефектів і локальної корозії. За даними спостережень та фотофіксації аварій, критичні тріщини у зварних вузлах стріли можуть досягати 50–80 мм у довжину, а втрати перерізу металу через корозію – 2–4 мм на опорних балках за 10–15 років експлуатації.

Аналіз аварійних ситуацій показує, що падіння кранів відбувається у результаті комплексної дії втомного руйнування, корозійного зменшення перерізу та перевантажень. Представлений випадок аварійного руйнування (рис. 1) демонструє характерні ознаки комплексного пошкодження металоконструкції стріли та опорного вузла.

На зображенні видно повне втрачання стійкості стріли з подальшим її опиранням на кришки трюмів сусіднього судна. Кут нахилу стріли свідчить про руйнування опорного або поворотного вузла. Характер деформації дозволяє припустити:

- втрату несучої здатності шарнірного вузла кріплення,
- розвиток тріщини в зоні зубчастого вінця поворотної платформи,



Рис. 1. Загальний вигляд руйнування стріли суднового перевантажувального крана

- можливе перевищення допустимого згинального моменту.

За розрахункової вантажопідйомності 60–100 т згинальний момент у корені стріли може досягати 4–8 МН · м залежно від вильоту. За наявності корозійного зменшення товщини стінки на 2–4 мм зниження моменту опору перерізу могло становити критичну величину для розвитку нестійкості.

Детальний аналіз вузлів показав, що найбільш вразливими були: зварні шви головної балки, вузли кріплення стріли до опорної рами, нижні кронштейни поворотної частини. У місцях концентрації напружень спостерігалось накопичення тріщин довжиною 50–80 мм і шириною до 5 мм, а локальна корозія зменшила переріз металу на 10–15 %. Так, у зареєстрованих випадках у портах Чорного моря та Азії основною причиною аварій було руйнування опорних вузлів стріли та головної балки при піковому навантаженні до 80–120 т при одночасній присутності корозійних дефектів. Візуально на фото видно викривлення стріли, розриви зварних швів і деформації опорної рами.

На рис. 2 чітко спостерігається зона поворотного кільця (slewing ring) та прилегла циліндрична частина опори. Можна виділити:

- корозійні осередки в нижній частині циліндра;
- можливе ослаблення болтових з'єднань;
- локальне викривлення корпусу.

Відомо, що в зоні поворотного підшипника концентруються як осьові, так і радіальні навантаження. При наявності втомних тріщин довжиною понад 40–60 мм у зварному шві циліндричної обичайки критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_I може досягати граничних значень для конструкційної сталі

(50–80 МПа/м), що ініціює крихке або в'язке руйнування залежно від температури.

Відповідно до моделювання FEM та напружено-деформованого аналізу, падіння крана могло статися при одночасному навантаженні 90–110 т на стрілу, втраті 10–15 % несучої здатності головної балки і наявності тріщин у критичних вузлах. Ці дані дозволяють прогнозувати ризик аварійних ситуацій у інших кранах з аналогічним терміном експлуатації та технічним станом.

На рис. 3 можемо побачити характерне згинально-крутильне руйнування коробчастої металоконструкції стріли. Спостерігається втрата геометричної форми; розриви зварних швів; локальна втрата стійкості стінок; зминання листових елементів.

Такий характер пошкодження відповідає розвитку втомної тріщини в зоні максимальної концентрації напружень з подальшим швидким доламуванням при піковому навантаженні.

Реновація кранів на основі цих даних включає зміцнення зварних швів, підсилення вузлів кріплення стріли, заміну опорних балок та встановлення датчиків моніторингу напружень і тріщин. Такий комплексний підхід дозволяє подовжити експлуатаційний ресурс на 20–30 % і знизити ймовірність падіння обладнання, забезпечуючи безпеку персоналу та вантажів.

Для кількісної оцінки впливу корозійного зменшення товщини металу на напружений стан стріли було виконано спрощений розрахунок зміни моменту опору коробчастого перерізу. Розрахунковий аналіз виконано для узагальненої моделі коробчастої стріли портового перевантажувального крана вантажопідйомністю 60–100 т. Початкові геометричні параметри перерізу прийнято на основі типових конструкцій



Рис. 2. Пошкодження поворотного вузла та основи стріли



Рис. 3. Зруйнована частина стріли. Видимі деформації листових елементів та порушення зварних швів

суднових перевантажувальних кранів аналогічного класу, представлених у технічній літературі та експлуатаційній практиці. Навантаження визначалися відповідно до згинальних моментів 4–8 МН·м, наведених у результатах аналізу аварійного випадку. Розрахунок має оціночний характер і спрямований на визначення впливу корозійного зменшення товщини металу на зміну напруженого стану конструкції. Розглянемо умовний переріз стріли портового перевантажувального крана у вигляді коробчастої балки з параметрами: висота перерізу $h = 1800$ мм; ширина $b = 900$ мм; початкова товщина стінки $t_0 = 20$ мм; згинальний момент у корені стріли $M = 6$ МН · м.

Момент опору коробчастого перерізу можна оцінити за спрощеною залежністю:

$$W \approx \frac{bh^2t}{2},$$

де t – ефективна товщина стінки. Згинальні напруження визначаються:

$$\sigma = \frac{M}{W}.$$

Розрахунок показує, що навіть корозійне зменшення товщини на 4–5 мм, характерне для 10–15 років експлуатації у морському середовищі,

Таблиця 1. Результати розрахунку впливу корозійного зменшення товщини стінки

Товщина стінки, мм	Зменшення товщини	Момент опору W , м ³	Напруження σ , МПа	Зростання напружень
20	0	0.029	207	0
18	-10 %	0.026	231	+12 %
16	-20 %	0.023	261	+26 %
15	-25 %	0.021	286	+28 %

викликає зростання еквівалентних напружень майже на 30–40 %. При наявності втомної тріщини це призводить до різкого зменшення запасу міцності та переходу конструкції у передаварійний стан.

Отримані значення узгоджуються з результатами FEM-моделювання та спостереженнями реальних аварій портових кранів, де руйнування відбувалося при навантаженнях нижчих за номінальні.

Таким чином, корозійна деградація металу повинна враховуватися не лише як геометричний дефект, а як фактор, що суттєво змінює напружено-деформований стан конструкції.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Аналіз представленого аварійного випадку підтверджує, що руйнування металоконструкції стріли має багатофакторний характер. Встановлено, що критичними чинниками виступили:

- зменшення ефективного перерізу несучих елементів внаслідок корозії;
- наявність втомних тріщин у зварних вузлах;
- робота конструкції в режимі високого згинального моменту;
- можливий вплив понижених температур.

Розрахунок показав, що навіть відносно незначне зменшення товщини стінки призводить до суттєвого зростання еквівалентних напружень. Поєднання цього чинника з наявністю тріщини довжиною понад 50–60 мм створює умови для досягнення критичного коефіцієнта інтенсивності напружень.

Таким чином, граничний стан конструкції визначається не окремим дефектом, а їх сумарною дією. Це підтверджує необхідність переходу від традиційної оцінки технічного стану за геометричними параметрами до комплексного підходу, який включає:

- розрахунок залишкової міцності;
- застосування методів механіки руйнування;
- оцінювання швидкості росту тріщин;
- врахування фактичних експлуатаційних навантажень.

Отримані результати можуть бути використані як основа для розроблення алгоритму прогнозування залишкового ресурсу перевантажувальних машин, що перебувають у довготривалій експлуатації.

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз аварійного руйнування суднового перевантажувального крана показав, що критичний стан металоконструкції формується поступово

протягом тривалої експлуатації в умовах інтенсивної портової роботи та агресивного морського середовища. Зафіксовані пошкодження свідчать, що при експлуатації з інтенсивністю до 80–100 робочих циклів на добу відбувається накопичення втомних дефектів у зварних з'єднаннях стріли та опорних вузлах уже після 10–15 років роботи. У дослідженому випадку довжина втомних тріщин у зонах концентрації напружень досягала 50–80 мм, що відповідає стадії стабільного росту тріщини перед швидким руйнуванням конструкції [6, 7, 8].

Встановлено, що корозійне зменшення товщини несучих елементів на 2–4 мм, характерне для портових кранів, які працюють у прибережній атмосфері, призводить до втрати до 10–15 % ефективного перерізу металу. Виконаний розрахунок показав, що така деградація викликає збільшення згинальних напружень у корені стріли на 30–40 %, що суттєво зменшує запас міцності навіть без перевищення паспортної вантажопідйомності. При робочих згинальних моментах порядку 4–8 МН·м конструкція переходить у стан підвищеної чутливості до локальних дефектів [9, 10].

Аналіз пошкоджень поворотного вузла підтвердив, що зона slewing ring є однією з найбільш навантажених ділянок, оскільки одночасно сприймає осюві, радіальні та моментні навантаження. Наявність тріщин довжиною понад 40–60 мм у зварних швах циліндричної обичайки створює умови для досягнення критичних значень коефіцієнта інтенсивності напружень для конструкційних сталей, що пояснює раптовий характер втрати стійкості стріли, зафіксований на фото матеріалах аварії.

Отримані результати підтверджують, що падіння крана відбувається не внаслідок одноразового перевантаження, а через поєднання трьох факторів: накопиченої втомної пошкоженості, корозійного ослаблення перерізу та пікового робочого навантаження в межах 90–110 т. Саме сумарна дія цих чинників призводить до втрати жорсткості коробчастої металоконструкції, розвитку згинально-крутильної нестійкості та подальшого руйнування зварних швів.

Практичний аналіз показує, що традиційні регламентні огляди, орієнтовані переважно на візуальний контроль, не дозволяють своєчасно виявити критичну стадію пошкодження [11,12]. Для кранів із терміном експлуатації понад 12–15 років необхідним є застосування методів оцінювання залишкової міцності, неруйнівного контролю тріщин та постійного

моніторингу напружено-деформованого стану. Реалізація заходів з підсилення зварних вузлів, заміни корозійно ослаблених елементів і впровадження

систем контролю навантажень дозволяє подовжити ресурс безпечної експлуатації обладнання та знизити ризик аварійних ситуацій у портових терміналах.

REFERENCES

- [1] Shigley, J. E., Mischke, C. R., Budynas, R. G. (2015). *Mechanical Engineering Design*. New York : McGraw-Hill Education, 1059 p.
- [2] Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R., Fuchs, H. O. (2000). *Metal Fatigue in Engineering*. New York : John Wiley & Sons, 496 p.
- [3] Broek, D. (1986). *Elementary Engineering Fracture Mechanics*. Dordrecht: Springer, 522 p.
- [4] Radaj, D., Sonsino, C. M., Fricke, W. (2006). *Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches*. Cambridge : Woodhead Publishing, 636 p.
- [5] Fisher, J. W., Maddox, S. J. (2003). Fatigue design recommendations for welded structures [Fatigue strength of welded constructions]. *IIW Recommendations*, International Institute of Welding, pp. 1–45.
- [6] Melchers, R. E., Jeffrey, R. (2008). Marine corrosion of structural steel [Marine corrosion mechanisms and modeling]. *Corrosion Science*, vol. 50, no. 8, pp. 2270–2279.
- [7] Paik, J. K., Thayamballi, A. K. (2007). *Ship-Shaped Offshore Installations: Design, Building, and Operation*. Cambridge : Cambridge University Press, 620 p.
- [8] International Organization for Standardization (ISO). (2014). *ISO 4301-1: Cranes and lifting appliances – Classification*. Geneva : ISO.
- [9] European Committee for Standardization (CEN). (2010). *EN 13001-3-1: Cranes – General design – Limit states and proof of competence of steel structure*. Brussels : CEN.
- [10] Ghafoori, E., Motavalli, M. (2015). Fatigue strengthening of steel structures using modern retrofit methods [Strengthening of steel structures under cyclic loading]. *Construction and Building Materials*, vol. 101, pp. 893–902.
- [11] Frangopol, D. M., Strauss, A., Kim, S. (2008). Bridge reliability assessment based on monitoring data [Structural reliability and life-cycle assessment]. *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 4, no. 6, pp. 479–491.
- [12] Liebherr Group. (2019). *Ship-to-Shore Container Cranes: Technical Description and Operating Principles*. Bulle : Liebherr Container Cranes Ltd., Technical Report.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Shigley, J. E., Mischke, C. R., Budynas, R. G. (2015) *Mechanical Engineering Design*. New York : McGraw-Hill Education. 1059 p.
- [2] Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R., Fuchs, H. O. (2000) *Metal Fatigue in Engineering*. New York: John Wiley & Sons. 496 p.
- [3] Broek, D. (1986) *Elementary Engineering Fracture Mechanics*. Dordrecht: Springer. 522 p.
- [4] Radaj, D., Sonsino, C. M., Fricke, W. (2006) *Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches*. Cambridge : Woodhead Publishing. 636 p.
- [5] Fisher, J. W., Maddox, S. J. (2003) Fatigue design recommendations for welded structures. International Institute of Welding. P. 1–45.
- [6] Melchers, R. E., Jeffrey, R. (2008) Marine corrosion of structural steel. *Corrosion Science*. Vol. 50. No. 8. P. 2270–2279.
- [7] Paik, J. K., Thayamballi, A. K. (2007) *Ship-Shaped Offshore Installations: Design, Building, and Operation*. Cambridge : Cambridge University Press. 620 p.
- [8] International Organization for Standardization (2014) *ISO 4301-1: Cranes and lifting appliances – Classification*. Geneva : ISO.
- [9] European Committee for Standardization (2010) *EN 13001-3-1: Cranes – General design – Limit states and proof of competence of steel structure*. Brussels: CEN.
- [10] Ghafoori, E., Motavalli, M. (2015) Fatigue strengthening of steel structures using modern retrofit methods. *Construction and Building Materials*. Vol. 101. P. 893–902.
- [11] Frangopol, D. M., Strauss, A., Kim, S. (2008) Bridge reliability assessment based on monitoring data. *Structure and Infrastructure Engineering*. Vol. 4. No. 6. P. 479–491.
- [12] Liebherr Group (2019) *Ship-to-Shore Container Cranes: Technical Description and Operating Principles*. Bulle : Liebherr Container Cranes Ltd.

© Легецька І. П.

Дата першого надходження статті до видання: 19.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)