

УДК 621.865.8:539.3

DOI 10.47049/2226-1893-2025-1-30-41

## ОЦІНКА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПОРТОВИХ ПЕРЕВАНТАЖУВАЛЬНИХ МАШИН

**І.П. Легецька**

викладач кафедри «Підйомно-транспортні машини  
та інжиніринг портового технологічного обладнання»  
ilegetskaaya@gmail.com

*Одеський національний морський університет, Одеса, Україна*

***Анотація.** Стан металокопструкцій порткових перевантажувальних машин в українських портах викликає тривогу через ряд проблем, таких як корозія, механічне зношування, відсутність модернізації, обмеженість ресурсів для технічного обслуговування та недостатнє застосування сучасних методів контролю.*

*З часом копструкції, що експлуатуються вже кілька десятиліть, підлягають суттєвому зносу, що призводить до зменшення їхньої несучої здатності та збільшує ризик аварій.*

*Вологе морське середовище сприяє корозії, а навантаження під час роботи перевантажувальних машин – втомі матеріалу і появі тріщин. Часто відсутність модернізації та обмежене фінансування технічного обслуговування призводять до аварійних ситуацій.*

*Нерегулярне використання сучасних методів неруйнівного контролю ускладнює своєчасне виявлення прихованих дефектів. У даній роботі розглянуто проблеми та потенційні рішення щодо стану металокопструкцій порткових перевантажувальних машин в українських портах.*

*Виявлено кілька основних проблем, таких як корозія, механічне зношування, відсутність модернізації та обмежене фінансування технічного обслуговування.*

*Зокрема, використовуються методи для оцінки напружено-деформованого стану металокопструкцій порталних кранів, зокрема поєднання аналітичного методу кінцевих елементів (МКЕ) та експериментального методу тензометрії.*

*У підсумку, інтеграція МКЕ і тензометрії дозволила отримати точні дані про стан копструкцій, що є критично важливим для забезпечення їх безпеки і ефективності в експлуатації.*

***Ключові слова:** перевантажувальні машини портів, корозія, механічне зношування, втома і тріциноутворення, метод кінцевих елементів, напружено-деформований стан, тензометрія, модернізація, технічне обслуговування, неруйнівний контроль.*

UDC 621.865.8:539.3

DOI 10.47049/2226-1893-2025-1-30-41

## ESTIMATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF PORT HANDLING MACHINES

**I.P. Lehetska**

Lecturer of the Department of Lifting and Transport Machines  
and Engineering of Port Technical Equipment  
ilegetskaya@gmail.com

*Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine*

**Abstract.** *The state of metal structures of port handling machines in Ukrainian ports is alarming due to several problems, such as corrosion, mechanical wear, lack of modernizations, limited resources for maintenance and insufficient application of modern control methods. Over time, structures that have been in operation for several decades are subject to significant wear and tear, which reduces their load-bearing capacity and increases the risk of accidents. The humid marine environment contributes to corrosion, while the stresses of transshipment machinery cause material fatigue and cracking. Lack of modernisation and limited funding for maintenance often lead to accidents. Irregular use of modern non-destructive testing methods makes it difficult to detect hidden defects on time. This paper examines the problems and potential solutions regarding the condition of metal structures of port handling machines in Ukrainian ports. Several major problems are identified, such as corrosion, mechanical wear, lack of modernisation and limited maintenance funding. In particular, methods are used to assess the stress-strain state of metal structures of portal cranes, a combination of the analytical finite element method (FEM) and the experimental method of strain measurement. As a result, the integration of FEM and strain gauging has made it possible to obtain accurate data on the condition of structures, which is critical to ensuring their safety and efficiency in operation.*

**Keywords:** *Port handling machines, corrosion, mechanical wear, fatigue and cracking, finite element method, stress-strain state, strain gauging, modernization, maintenance, non-destructive testing.*

**Вступ.** Стан металоконструкцій портових перевантажувальних машин у портах України на сьогоднішній день викликає занепокоєння через низку чинників. Багато з цих машин перебувають в експлуатації вже кілька десятиліть, що призводить до значного зносу металоконструкцій. Основними проблемами є: корозія, механічне зношування, відсутність модернізації, обмеженість ресурсів для технічного обслуговування, недостатнє впровадження сучасних методів контролю. Постійний вплив вологого морського середовища сприяє корозійному пошкодженню металевих конструкцій, що знижує їхню несучу здатність. Навантаження під час роботи перевантажувальних машин призводить до втоми матеріалу, появи

тріщин і деформацій, що вимагає ретельного контролю та своєчасного ремонту. Багато машин не піддавалися значним модернізаціям, що знижує їх ефективність та безпеку. Через економічні труднощі часто недостатньо уваги приділяється регулярному обслуговуванню та ремонту машин, що може призводити до аварійних ситуацій. Застосування сучасних методів неруйнівного контролю є обмеженим, що ускладнює своєчасне виявлення прихованих дефектів. Для забезпечення безпеки та ефективної роботи портових перевантажувальних машин в Україні необхідно посилити моніторинг технічного стану металоконструкцій, впроваджувати сучасні технології діагностики та підвищити інвестиції у модернізацію та ремонт обладнання.

**Мета статті.** Визначення напружено-деформованого стану металоконструкцій портових машин шляхом поєднання методу кінцевих елементів і тензометрії для підвищення точності оцінки їхнього стану та безпеки експлуатації.

**Основна частина статті.** Одним із перспективних методів для визначення напружено-деформованого стану металоконструкцій портових машин є поєднання аналітичного методу кінцевих елементів та експериментального методу тензометрії. Це комбінування підходить для оцінки стану конструкцій, дозволяючи отримувати детальну інформацію про розподіл напружень і деформацій у різних елементах металоконструкцій. Поєднання аналітичного методу кінцевих елементів (МКЕ) та експериментального методу тензометрії дійсно є одним із перспективних підходів для визначення напружено-деформованого стану металоконструкцій портових машин. Метод кінцевих елементів (МКЕ) дозволяє створити детальну математичну модель конструкції, враховуючи всі можливі варіанти навантажень і матеріальних властивостей. Це дає можливість прогнозувати поведінку конструкції в різних умовах, виявляти потенційні зони підвищених напружень і деформацій, що можуть бути критичними для безпечної експлуатації. Метод тензометрії доповнює цей аналіз експериментальними даними, які отримуються безпосередньо під час реальної експлуатації обладнання. Він дозволяє виміряти фактичні напруження в окремих точках конструкції, підтверджуючи або коригуючи результати, отримані за допомогою МКЕ [1-3].

Переваги цього поєднання полягають у можливості отримання як теоретичних, так і практичних даних про стан конструкції, що забезпечує більш точний і надійний аналіз. Це особливо важливо для складних металоконструкцій, де вплив різних факторів може бути складно передбачити виключно за допомогою одного методу. Таким чином, інтеграція аналітичного і експериментального підходів дозволяє не лише підвищити точність оцінки стану металоконструкцій, але й зменшити ризики аварійних ситуацій, що сприяє підвищенню загальної безпеки портових перевантажувальних машин.

МКЕ забезпечує комплексний аналіз напружено-деформованого стану всіх елементів крана (колона, стріла, опори, рама тощо), що дозволяє оцінити вплив різних навантажень. Метод ідентифікує критичні зони з підвищеними напруженнями, допомагаючи запобігти аваріям.

Оцінюється стійкість крана до зовнішніх впливів (вітер, динамічні навантаження), що знижує ризик перекидання. МКЕ сприяє оптимізації конструкції, зменшенню маси, покращенню міцності та економії матеріалів.

Метод дозволяє аналізувати динамічні процеси (вібрації, удари), враховувати експлуатаційні фактори (корозія, температура) та моделювати аварійні ситуації, підвищуючи безпеку та довговічність крана.

Застосування методу кінцевих елементів до всієї металоконструкції порталного крана є надзвичайно ефективним інструментом для забезпечення надійності, безпеки і оптимізації конструкції. МКЕ дозволяє всебічно аналізувати поведінку крана під різними навантаженнями, виявляти потенційні проблеми та розробляти конструкційні рішення, що підвищують довговічність і ефективність роботи крана. Це сприяє зниженню ризиків аварій і забезпечує стабільну роботу крана в різних умовах експлуатації [4].

Для перевірки міцності металоконструкції крана використовувалася програма ANSYS APDL, яка базується на методі кінцевих елементів. В процесі аналізу були розглянуті п'ять розрахункових випадків конструкції крана, що відрізнялися між собою напрямком сил, викликаних уклоном і вітром.

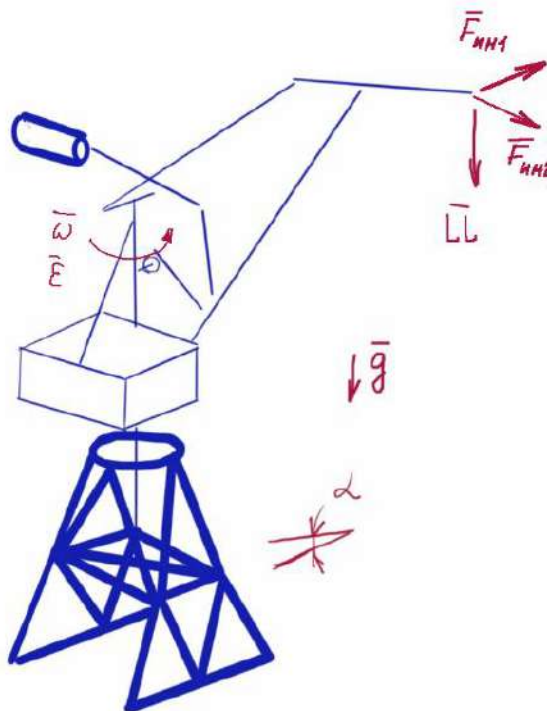


Рис. 1. Схема навантажень для випадку 1  
(сили від уклону прикладені уздовж траєкторії руху крана)

Це означає (рис. 1), що навантаження діють у горизонтальному напрямку вздовж рухомого шляху або рейок, по яких пересувається кран. Вплив сил уклону може призвести до додаткових напружень у структурних елементах крана, таких як колони, стріли та рейки, що може збільшити навантаження на певні зони конструкції і вимагає ретельного аналізу для забезпечення її міцності.

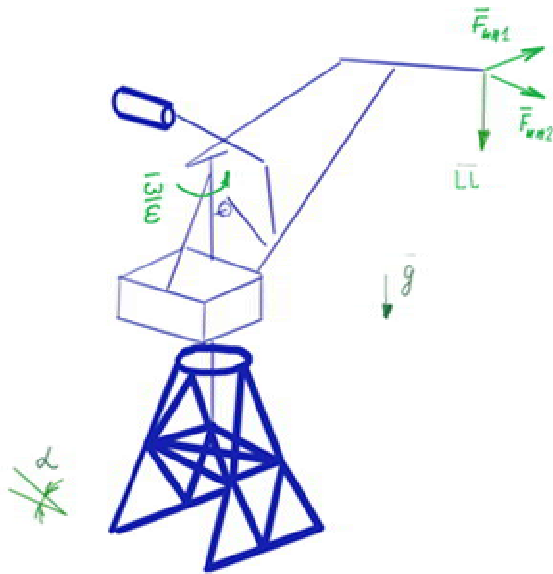


Рис. 2. Схема навантажень для випадку 2

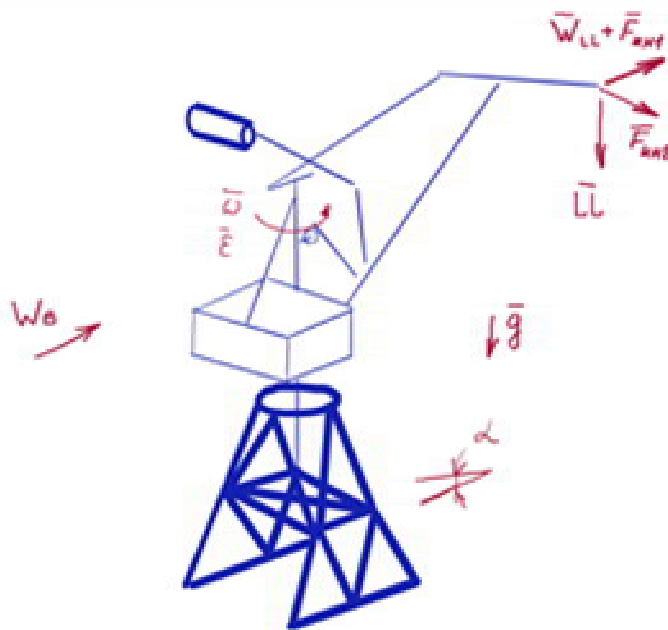


Рис. 3. Схема навантажень для випадку 3  
(сили, що діють уздовж шляху крана)

Сили вздовж шляху створюють подовжні навантаження на конструкцію, які можуть вплинути на колони, поперечини і стріли крана, що приводить до розтягу або стиснення елементів конструкції. Виникнення подовжніх напружень може створювати додаткові зусилля в горизонтальних і вертикальних елементах. Подовжні сили можуть викликати деформації (вигин, скручування).

На рис. 2 сили від уклону діють перпендикулярно до напрямку руху крана. Це може створювати бокові навантаження на конструкцію, що впливають на стабільність і баланс конструкції. Такі сили можуть викликати додаткові напруження в горизонтальних і вертикальних елементах конструкції крана, таких як колони, поперечини, стріли і рейки. Бокові сили можуть призвести до деформацій конструкції, таких як вигини або зсуви, що можуть вплинути на точність позиціонування і роботу крана.

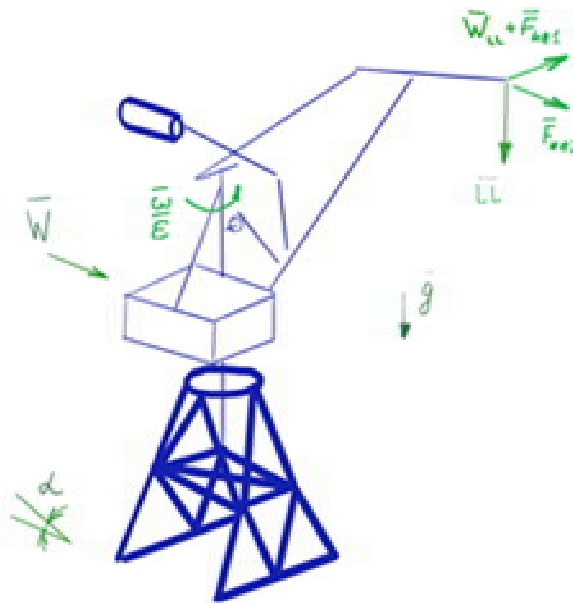


Рис. 4. Схема навантажень для випадку 4

Для випадку 4 сили, що діють поперек шляху крана, створюють бічні навантаження, які можуть призвести до вигину або зсуву елементів конструкції. Це може бути особливо важливо для стріл, колісних блоків і кронштейнів. Бічні сили можуть зменшувати стійкість конструкції, що може призвести до небажаних деформацій або навіть до порушення цілісності конструкції.

Для випадку 5 застосовується схема рис. 1, в якому сили від уклону прикладені уздовж траєкторії руху крана і збільшується маса вантажу від 32 до 40 т.

На прикладі випадку 1 розглянемо результати, отримані за допомогою даної програми.

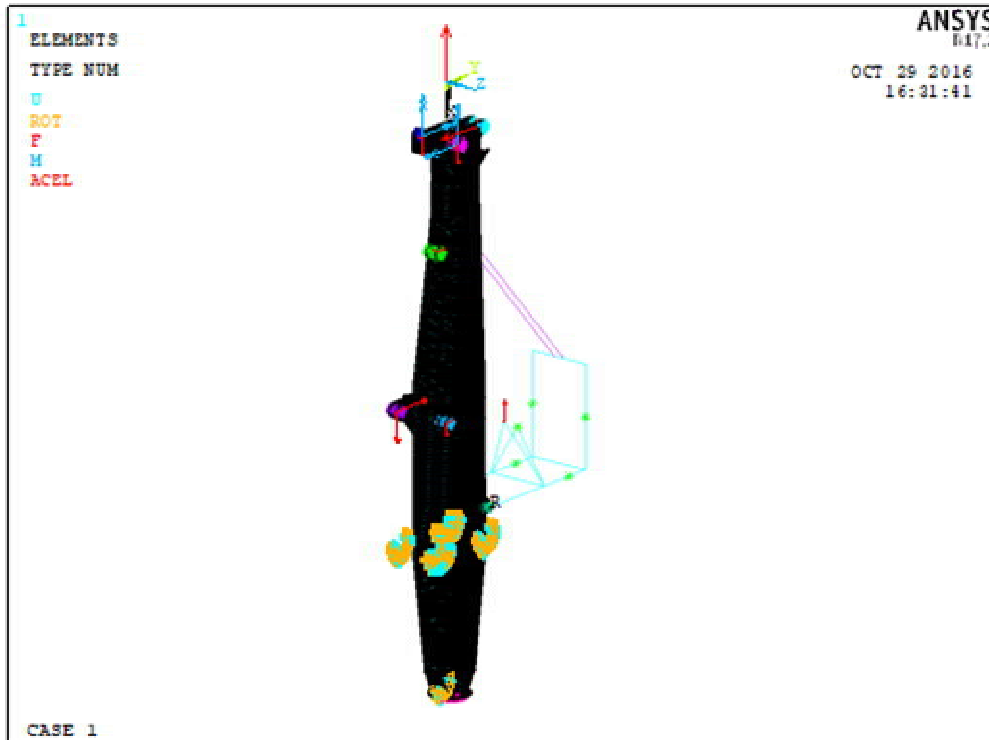


Рис. 5. Граничні умови для випадку 1

Для моделювання металоконструкції колони використовувались оболочкові кінцеві елементи SHELL 181 (чотирьох вузлові елементи). Цей тип елемента дозволяє точно врахувати вигини і деформації тонкостінних конструкцій. Машинне відділення моделювалось за допомогою жорстких балкових елементів MPC 184. Моделювалась кінцевим елементом, що працює тільки на розтягнення/стискання (MPC 184, LINK), що дозволяє врахувати лише вертикальні сили. Для моделювання власних ваг машинного відділення, нерухомих противаг на задній стінці і підлоги машинного відділення використовувались зосереджені маси (MASS 21) [3].

Нижня частина рами прикріплювалась до колони за допомогою шарніра обертання (MPC184, rev). Це забезпечує можливість обертання рами і передачу навантаження через шарнір. Заборонено переміщення «ведучого» вузла у всіх напрямках і обертання навколо вертикальної осі колони. Опорні катки обмежені в горизонтальному напрямку за допомогою контакту з оголовком портала. Колона навантажується силами, отриманими з розрахунку стрелової системи. Додатково до навантажень від стрелової системи колона підлягає інерційним навантаженням від обертання і розгону обертання колони. Для певних випадків (3, 4) враховується навантаження від вітру. Додається до моделі сила, що діє в точці, яка моделює барабан підйомного механізму.

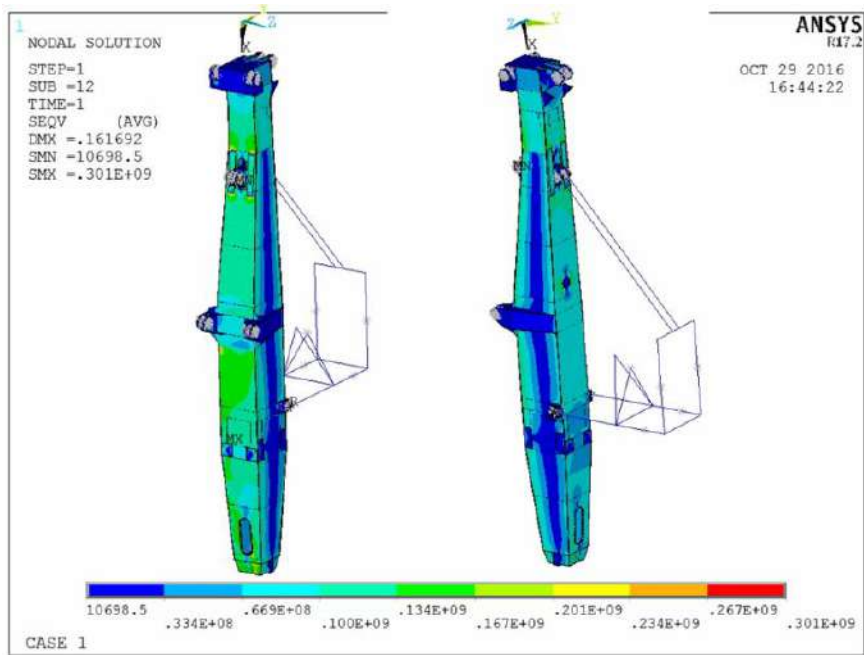


Рис. 6. Еквівалентні напруження за Мізесом в колоні

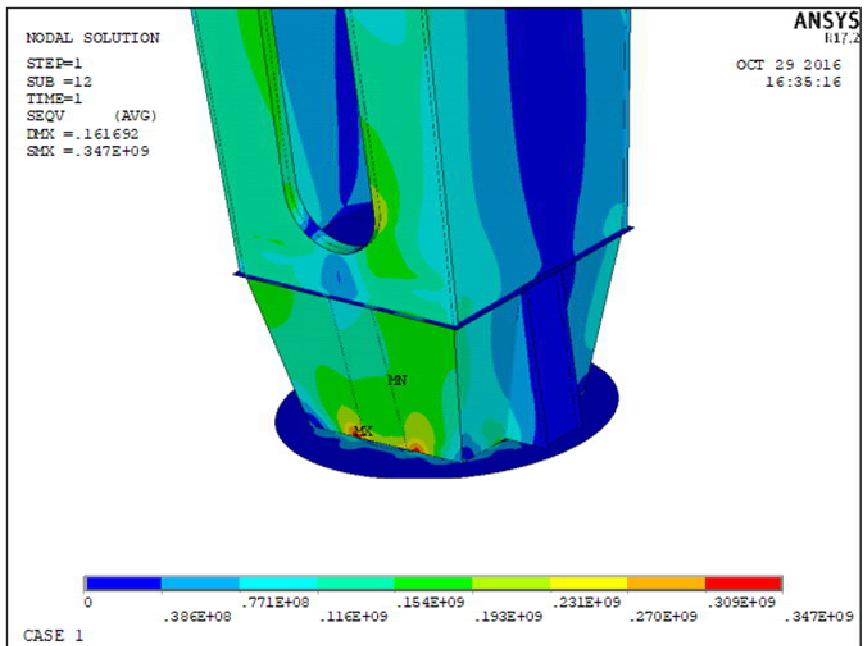


Рис. 7. Еквівалентні напруження за Мізесом у підп'ятнику колони



Після побудови моделі та прикладення усіх сил стало зрозуміло, що напруження в передній і задній полицях колони в окремих місцях перевищують допустимі для заданої товщини та типу сталі. Потрібне локальне посилення передньої і задньої полиць колони.

Розрахунок на циклічну міцність необхідно провести для конкретної схеми посилення колони після проведення розрахунку на статичну міцність. При цьому критерій статичної міцності має бути задоволений. Аналізуючи дані, отримані програмою ANSYS зробили висновок, що міцність бокового листа колони за критерієм втрати стійкості задовольняє вимоги. Статична міцність переднього листа за критерієм втрати стійкості не задовольняє вимогам. Лист необхідно посилити куточком L300x100x10,5x15, матеріал 17ГС або 17Г1С, розташованим по центру, уздовж осі колони.

Визначення тиску в горизонтальних катках колонни порталного крана проводиться з метою оцінки адекватності моделі крана, використовуваної в розрахунках. Інформація про центри тяжіння додаткових елементів (електричних шаф, кабіни крановщика, нерухомих противаг тощо) була взята з технічної документації фірми ТОВ «Діалаб».

Для реєстрації та обробки отриманої інформації з первинних перетворювачів деформації була використана програма Power Graph 3.3.



*Рис. 8. Тензостанція з 32 інформаційними каналами*

Тензорезистори приклеювалися на розвантажену частину катка. При повороті крана тензорезистор потрапляє в зону напружень у катку, викликаних його контактом з опорно-поворотним кругом. Після калібрування за допомогою калібрувальної кривої, отриманої в результаті розрахунків, на основі відомих значень

деформації точки колеса, де приклеєний тензорезистор, визначали горизонтальну силу на каток [5; 6].

На кожному передньому катку розміщено по одному тензорезистору, вісь якого наплавлена радіально. Каток має з одного боку кришку, тому наклейка повинна проводитися зі сторони, протилежної кришці. Попередньо очистили місце наклейки тензодатчика до гладкого стану (остання шкурка – фінішна), очистили поверхню від бруду та абразиву за допомогою ацетону, видалили вологу з поверхні спиртом. Після наклейки на деякий час залишили, щоб клей затвердів.

Вимірювання проводилися для номінального вантажу 32 тонни.

1. Виставили стрелову систему крана в положення, відповідне вильоту 32 метри з тестовим вантажем. Спочатку тензорезистори на катках повинні бути розвантажені.

2. Розпочали запис сигналу.

3. Виконали поворот на кут, досягнувши того, щоб частина катка з тензорезисторами, обертаючись, сприймала навантаження від контакту з оголовком портала. Продовжували обертання, поки навантаження повністю не спаде.

4. Повернули кран у зворотний бік до початкового положення тензорезистора (до його повного розвантаження).

5. Повторили ще раз.

Повторювали процедуру для вильоту 24 та 15 метрів відповідно.

Результати тензометрії підтвердили адекватність розрахункових моделей та розподілу навантаження на боковий лист. Тобто боковий лист є достатньо міцним і не потребує додаткових посилень для забезпечення стабільності конструкції. В передніх листах виникли високі рівні напружень та деформацій, які перевищують дозволені межі. Це може свідчити про наявність ризиків руйнування або нестабільності переднього листа при навантаженні.

Результати тензометрії підтверджують раніше отримані дані програмою ANSYS.

**Висновки.** Аналіз технічного стану металоконструкцій портових перевантажувальних машин в Україні показує наявність значних проблем, пов'язаних із корозією, механічним зношуванням, обмеженими ресурсами на технічне обслуговування та недостатнім впровадженням сучасних методів контролю. Портів перевантажувальні машини, що експлуатуються вже кілька десятиліть, потребують посиленої уваги для забезпечення їхньої безпеки і надійності. Одна з перспективних методик для оцінки напружено-деформованого стану металоконструкцій – це поєднання аналітичного методу кінцевих елементів (МКЕ) та експериментального методу тензометрії. МКЕ дозволяє створювати детальні математичні моделі конструкцій, оцінювати їхню міцність та стійкість під різними навантаженнями, а метод тензометрії забезпечує точні вимірювання фактичних напружень в реальних умовах експлуатації. У випадку портального крана «Кондор» використання МКЕ продемонструвало можливість детального аналізу розподілу напружень, виявлення зон підвищених навантажень і оптимізації конструкції. Зокрема, розрахунки за допомогою програми ANSYS APDL підтвердили потребу в посиленні окремих елементів конструкції, таких як передні та задні полиці колони, що є критичними для запобігання аваріям. Тензометричні дослідження підтвердили

адекватність моделі, отриманої за допомогою МКЕ, і вказали на необхідність посилення передніх листів колони. Дані тензометрії, які проводились на катках крана, підтвердили, що боковий лист конструкції є достатньо міцним, але передні листи потребують додаткового посилення.

В цілому, поєднання аналітичних і експериментальних методів дозволяє підвищити точність оцінки технічного стану портових перевантажувальних машин, зменшити ризики аварійних ситуацій і забезпечити їх стабільну та безпечну експлуатацію. Для покращення ситуації національних портів України необхідно впроваджувати сучасні технології діагностики та інвестувати в модернізацію і обслуговування обладнання.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Nemchuk O., Hredil M., Pustovoy V., Nesterov O, (2019). Role of in-service conditions in operational degradation of mechanical properties of portal cranes steel. *Procedia Structural Integrity*. 16. P. 245-251.
2. Nemchuk O. O. Influence of the working loads on the corrosion resistance of steel of a marine harbor crane. *Materials Science*, 54(5). P. 743-747.
3. Nemchuk O., Konoplyov A., Kibakov O., & Lehetska I. (2023). Review and analysis of methods for assessing damage to steel structure of lifting machines. *Transport Development*, 4(19), 48-55. <https://doi.org/10.33082/td.2023.4-19.04>
4. Легецька І.П. (2024) Застосування методу поляризаційного опору сталей для контролю деградації металоконструкцій портових кранів. *Вісник ОНМУ*, 1(73)
5. Lehetska I.P. Ship unloader structure fatigue damage analysis and residual life assessment using magnetic (coercive force) nondestructive test method. *Findings of modern engineering research and developments: Scientific monograph*. Riga, Latvia: «Baltija Publishing», 2022. P. 265-294 DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-207-4-10>
6. Немчук О.О., Легецька І.П., Кокошко Є.М. Визначення напружено-деформованого стану металоконструкцій портових перевантажувальних машин в умовах експлуатації. *Збірник тез доповідей 76 професорсько-викладацької науково-технічної конференції*. Одеса, 2023. 460 с.
7. Немчук О., Конопльов А., Легецька І. Аналіз ефективності методів вантажопідйомних машин. *Збірник тез Міжнародної практичної конференції «Розбудова і відновлення машинобудівного комплексу України» 30 травня 2023 р.*, Харків
8. Немчук О.О., Стрельцов П.М., Легецька І.П. Розробка методів підвищення продуктивності перевантажувального обладнання в портах Чорноморсько-Балтійського басейну з метою забезпечення економічної сталості країн регіону. *Збірник тез Міжнародної наукової конференції «Морська безпека Балтійсько-Чорноморського регіону: виклики та загрози» 3 грудня 2021 р.* Одеса, Україна.

## REFERENCES

1. Nemchuk O., Hredil M., Pustovoy V., Nesterov O, (2019). Role of in-service conditions in operational degradation of mechanical properties of portal cranes steel. *Procedia Structural Integrity*. 16. P. 245-251.
2. Nemchuk O. O. Influence of the working loads on the corrosion resistance of steel of a marine harbor crane. *Materials Science*, 54(5). P. 743-747.
3. 3. Nemchuk, O., Konoplyov, A., Kibakov O., & Lehetska, I. (2023). Review and analysis of methods for assessing damage to steel structure of lifting machines. *Transport Development*, (4(19), 48-55. <https://doi.org/10.33082/td.2023.4-19.04>
4. Lehetska I.P. (2024) Zastosuvannia metodu polyaryzatsiinoho oporu stalei dlia kontroliu dehradatsii metalokonstruksii portovykh kraniv (in ukrainian), *Visnyk ONMU*, 1(73).
5. Lehetska I.P. (2022). Ship unloader structure fatigue damage analysis and residual life assessment using magnetic (coercive force) nondestructive test method. Findings of modern engineering research and developments: Scientific monograph. Riga, Latvia: «Baltija Publishing», 2022, 265-294. DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-207-4-10>
6. Nemchuk O.O., Lehetska I.P., Kokoshko Ye.M. (2023). Vyznachennia napruzhenno-deformovanoho stanu metalokonstruksii portovykh perevantazhuvalnykh mashyn v umovakh ekspluatatsii (in Ukrainian). Odesa. 460 p.
7. Nemchuk O., Konopliov A., Lehetska I (2023). Analiz efektyvnosti metodiv vantazhopididomnykh mashyn.(in Ukrainian) *Zbirnyk tez Mizhnarodnoi praktychnoi konferentsii «Rozbudova i vidnovlennia mashynobudivnoho kompleksu Ukrainy»*. Kharkiv.
8. Nemchuk O.O., Streltsov P.M., Lehetska I.P. (2021). Rozrobka metodiv pidvysshchennia produktyvnosti perevantazhuvalnoho obladnannia v portakh Chornomorsko-Baltiiskoho baseinu z metoiu zabezpechennia ekonomichnoi stalosti krain rehionu. *Zbirnyk tez Mizhnarodnoi naukovoï konferentsii «Morska bezpeka Baltiisko-Chornomorskoho rehionu: vyklyky ta zahrozy»* Odesa, Ukraina.

*Стаття надійшла до редакції 24.12.2024*

**Посилання на статтю: Леґецька І.П.** Оцінка напружено-деформованого стану портових перевантажувальних машин // *Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць*, 2025. № 1 (75). С. 30-41. DOI 10.47049/2226-1893-2025-1-30-41.

*Article received 24.12.2024*

**Reference a journal artic: Lehetska I.P.** Estimation of the stress-strain state of port handling machines // *Herald of the Odesa National Maritime University: Coll. scient. works*, 2025. № 1 (75). P. 30-41. DOI 10.47049/2226-1893-2025-1-30-41.