

V. A. Mashchenko, O.O. Panchuk, I.O. Sadovenko, M. A. Borduk // Bulletin of Engineering Academy of Ukraine, – 2012. Iss. 3–4, P. 60–64.

6. Ishii Y. Transmission of ultrasonic waves at oblique incidence to composite laminates with spring-type interlayer interfaces / Y. Ishii, S. Biwa // J. Acoust. Soc. Am. – 2015. – V.138. – N. 5. – P. 2800–2810.

7. Bulakh I. O. The analysis of methods of non-destructive flaw detection of the products from composite materials / I. O. Bulakh, O. V. Hloba // Visnyk of Chernihiv State Technological University. – 2013. – N 2 (65). – P. 36–42.

8. Pedersen P. Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook. Second Edition Spatial, Mechanical, Thermal, and Radiation Measurement. – CRC Press, 2014.

9. Buiochi F. Ultrasonic Characterization of Anisotropic Materials / F. Buiochi, M. Andrade,

N. Perez, J. Adamowski // Comprehensive Materials Processing. – 2014. – V. 2. – P. 65–81.

10. Rokhlin S. I. Physical Ultrasonics of Composites / S. I. Rokhlin, D. E. Chimenti, P. B. Nagy. – Oxford University Press, New York, 2011. – P. 225–368.

11. Schoch A. Der Schalldurchgang durch Platten / A. Schoch // Acustica. – 1952. – B. 2. – H. 1. – S. 1–17.

12. Brehovsky L. M. Waves in layered media / L. M. Brehovsky. – M.: Nauka, 1973. – 343 p.

13. Gubaidullin A. A. Computer modeling of wave processes in porous media / A. A. Gubaidullin O. Yu. Boldyreva // Proceedings in cybernetic. – 2016. – N 2. – P. 103–111.

14. Landau L. D. Theory of Elasticity / L. D. Landau, E. M. Lifshitz. – M.: Nauka, 1985. – 245 p.

Надійшла до редакції 27.10.2018

УДК 534.111

Л. В. Коломієць¹, д.т.н., О. М. Лимаренко², к.т.н.

¹Одеська державна академія технічного регулювання та якості, м. Одеса

²Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса

КОМП'ЮТЕРНИЙ ТА НАТУРНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ НАПРУЖЕНЬ І ДЕФОРМАЦІЙ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЇ ПРИЧАЛЬНОГО КОНТЕЙНЕРНОГО ПЕРЕВАНТАЖУВАЧА

У роботі розглянуто підхід до оцінки залишкового ресурсу вантажопідійомних машин, що знаходяться тривалий час в експлуатації, на базі математичного моделювання з використанням методу скінченних елементів для визначення полів напружень та виявлення найбільш небезпечних зон. Для отримання реальних навантажень, що виникають в металоконструкціях перевантажувачів проведено натурний експеримент шляхом використання тензометрії при максимально можливому їх навантаженні з подальшим порівнянням отриманих даних з розрахунковими. На підставі отриманих результатів зроблені висновки про поточний стан металоконструкцій окремої вантажопідійомної машини та про умови можливості подальшої експлуатації металоконструкції розглянутих причальних контейнерних перевантажувачів. Визначено ресурс роботи крану.

Ключові слова: підійомно-транспортна машина, метод скінченних елементів, експеримент натурний, експеримент комп'ютерний, напруження, деформації, розрахунок, вимірювання.

Л. В. Коломиец, д.т.н., А. М. Лимаренко, к.т.н.

КОМПЬЮТЕРНЫЙ И НАТУРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ МЕТАЛОКОНСТРУКЦИИ ПРИЧАЛЬНОГО КОНТЕЙНЕРНОГО ПЕРЕГРУЖАТЕЛЯ

В работе рассмотрен подход к оценке остаточного ресурса грузоподъемных машин, находящихся длительное время в эксплуатации, на базе математического моделирования с использованием метода конечных элементов для определения полей напряжений и выявления наиболее опасных зон. Для получения реальных нагрузок, возникающих в металоконструкциях перегружателей проведен натурный эксперимент путем использования тензометрии при максимально возможном их нагружении с последующим сравнением полученных данных с расчетными. На основании полученных результатов сделаны выводы о текущем состоянии металоконструкций отдельной грузоподъемной

машины и об условиях возможности дальнейшей эксплуатации металлоконструкции рассмотренных причальных контейнерных перегружателей. Определен ресурс работы крана.

Ключевые слова: подъемно-транспортная машина, метод конечных элементов, эксперимент натурный, эксперимент компьютерный, напряжения, деформации, расчет, измерение.

L. V. Kolomiets, DSc, O. M. Lymarenko, PhD

COMPUTER AND NATURAL EXPERIMENT IN DETERMINATION OF STRESSES AND DEFORMATIONS OF METAL STRUCTURES

In this work, an approach to estimating the residual life of load-lifting machines that have been in operation for a long time, using mathematical modeling using the finite element method to determine stress fields and identify the most dangerous zones, was considered. The analysis shows that the average age of cranes is outside the allowed limits. The issue of updating the fleet of lifting machines and technical re-equipment of industrial enterprises requires time and large capital expenditures. The purchase of new crane equipment raises the question of its cost, design and manufacture time, methods of its transportation to the destination, installation, its settings and other current problems, implies a long waiting time and significant capital costs.

Recently, methods and technologies have been introduced into engineering practice, which allow today, at relatively low cost, to significantly increase the operational resource of the existing load-lifting machinery fleet.

The development of modern technology can significantly reduce the wear and destruction of elements of metal structures of crane equipment and their mechanisms, by establishing frequency control, was not available in this form in previous years.

To obtain real loads arising in the metal structures of the loaders, a full-scale experiment was carried out by using strain gauges at the maximum possible load and then comparing the obtained data with the calculated ones. The research methods are mathematical, a full-scale experiment and statistical.

The conclusions about the current state of the metal structures of the individual lifting machine and about the conditions for the possibility of further operation of the metal structures of these control panels were drawn based on the obtained results. (Based on the results obtained, conclusions were drawn about the current state of the metal structures of the individual lifting machine and about the conditions for the possibility of further operation of the metal structures of these control panels.) The approach to solving this problem can be applied to most types of lifting machines in operation.

Key words: hoisting (lifting?) machine, finite element method, full-scale experiment, computer experiment, stresses, deformations, calculation, measurement.

[DOI 10.32684/2412-5288-2018-2-13-32-41](https://doi.org/10.32684/2412-5288-2018-2-13-32-41)

Постановка проблеми. Різке скорочення надходження нових кранів в Україні за останню чверть століття призвело до того, що промислові підприємства опинилися в дуже складному становищі: зношення парку вантажопідіймальних кранів досягло 90 %; економічне становище портів країни в цілому унеможливило придбання нових кранів. Аналіз стану показує, що середній вік кранів знаходиться за межами дозволених норм.

Питання відновлення парку вантажопідіймних машин та технічного переозброєння промислових підприємств вимагає часу і великих капітальних витрат. Придбання нового кранового обладнання викликає питання про його вартість, терміни конструювання та виготовлення, способи його транспортування до місця призначення, монтаж, його налаштування та інші поточні проблеми, що передбачає тривалий час очікування

та значні капітальні витрати.

Останнім часом в інженерну практику впроваджуються методи та технології, які дозволяють вже сьогодні при відносно невеликих витратах істотно збільшити експлуатаційний ресурс наявного парку вантажопідіймних машин.

Розвиток сучасної техніки дозволяє значно скоротити зношування та руйнування елементів металоконструкцій кранового обладнання та їх механізмів, шляхом встановлення частотного управління, яке не було доступним в такому вигляді в попередні роки.

Питання аналізу стану, перевірки та вдосконалення існуючого кранового обладнання, в першу чергу, ставить задачу про визначення реального стану металоконструкції, причини руйнування металоконструкції, визначення способів реконструкції досліджуваної металоконструкції, які дали б можливість надалі використати вантажо-

підйомну машину як дієву одиницю робочого процесу без значних подальших витрат на ремонт металокопструкції та кранового обладнання.

Продовження терміну безпечної експлуатації технічних пристроїв здійснюється на основі оцінки їх індивідуального технічного стану. Такий підхід використовується зараз в цивільній авіації, в енергетиці, важкій і гірничодобувній промисловості, в практиці експлуатації автомобілів, будівельно-дорожніх машин та сільськогосподарської техніки.

Методологія прогнозування індивідуального ресурсу роботи та інших індивідуальних показників надійності не відрізняється від методології прогнозування на стадії проектування.

У загальному випадку стан підйомно-транспортної машини оцінюється з точки зору міцності, статичної і тривалої (багато- та малоциклової втоми), зносу, крихкого руйнування, водневого та корозійного розтріскування, корозії та ін.

При цьому розрахунки повинні, згідно зі стандартними методиками, мати експериментальну перевірку. Важливо відзначити і той факт, що стандартна документація не регламентує спосіб оцінки залишкового ресурсу.

Як правило, при оцінці залишкового ресурсу обмежуються перевіркою статичної міцності металокопструкції та розрахунком на опір.

Слід також зауважити, що ці розрахунки, як правило, виконуються з тими або іншими спрощеннями.

Розглянемо існуючі, найбільш поширені методики розрахунку залишкового ресурсу копструкцій та зробимо їх оцінку з точки зору можливості застосування до реальної вантажопідйомної машини.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Науковому обґрунтуванню питань числового аналізу та методів дослідження міцності, жорсткості та надійності кранових копструкцій присвячені роботи науковців Баженова В. А., Бычкова Д. В., Григор'єва М. І., Кузнечного Б. С., V. Shastry, G. V. Rao. Роботи авторів Бузуна І. Н., Городецького А. С., Москвичової Л. Ф. присвячені визначенню та аналізу несучої системи металевої копструкції з використанням систем САПР та сучасного обладнання.

Більшість програм для проведення комп'ютерного експерименту побудовано на використанні математичного апарату методу скінченних елементів (МСЕ).

Відомо [1-5], що конструктивні елементи всіх підйомно-транспортних машин мають свою міцнісну та жорсткісну попередню історію, яку

важко переоцінити, особливо кранів, які знаходяться в експлуатації десятки років. Доведено, що величина деформацій та напружень, що фіксують в матеріалі, перевищує допустиму похибку лінійних розмірів та кутових деформацій [1, 3, 4]. Тобто сучасні дослідження металокопструкцій повинні проводитись з раціональним використанням числового та фізичного експериментів, та проводити визначення механічних параметрів як натурними, так і комп'ютерними методами для забезпечення експлуатації підйомно-транспортних машин без ушкоджень [6-10].

Мета дослідження. Провести аналіз технологічного процесу перевантаження вантажів, що обробляються та плануються переробляти за допомогою причального контейнерного перевантажувача (ПКП), та визначити фактичний стан металевих копструкцій для ПКП. Розглянути існуючі, найбільш поширені методики розрахунку залишкового ресурсу копструкцій. Виконати типові розрахунки за нормальним напруженням. Розробити математичну модель розглянутої металокопструкції крана за допомогою системи рівнянь методу скінченних елементів. За допомогою комп'ютерної реалізації чисельного методу розрахунку МСЕ провести комп'ютерний експеримент та розглянути копструкцію ПКП при різних варіантах навантаження, а також визначити небезпечні перерізи та області для проведення натурального експерименту. Для натурального експерименту застосувати метод тензометрії, який є одним з найбільш ефективних методів експериментального визначення полів деформацій та напружень в натурних копструкціях. Визначити залишковий ресурс роботи металокопструкції підйомно-транспортної машини.

Викладання основного матеріалу. Для дослідження напружено-деформованого стану (НДС) металокопструкції вантажопідйомних машин використовують аналітичні, чисельні та експериментальні методи.

Аналітичний метод призначений для визначення НДС стрижневих копструкцій, базується на принципах будівельної механіки, опору матеріалів і в більшості випадків використовує гіпотезу плоских перетинів.

Цей метод використовується для попередніх та проектувальних розрахунків, необхідних для вибору габаритних розмірів поперечного перерізу елементів металокопструкції.

Розв'язання ж складних завдань аналітичним методом досить важке, а при складній конфігурації геометрії досліджуваних елементів металокопструкції, навіть неможливе, тому, що пов'язане з розв'язанням диференціальних рівнянь теорії пружності. Основними перевагами

цього методу є можливість аналізу впливу окремих елементів на отриманий результат, можливість знаходження оптимального розв'язання.

Чисельний метод визначення НДС в основному проводиться методом скінченних елементів, який дозволяє вести розрахунок елементів зі складною конфігурацією та видами навантажень. За необхідності може бути облік нелінійності (геометричної, фізичної).

Ринок програмних продуктів, які використовують МСЕ, представлений такими програмами для складних розрахунків, як ABAQUS, ANSYS, RoboBAT, MSC / Nastran, Lira, Scad та ін.

Експериментальний метод визначення НДС використовується в умовах значної невизначеності, тобто коли не вистачає даних для попередньої оцінки реальних сил, що діють на ПКП або для перевірки обліку всіх сил при розрахунку чисельними методами.

Експериментальний метод дає найкращий результат в поєднанні з аналітичними або чисельними методами. Так при використанні, наприклад, первинних перетворювачів (тензорезисторів) для експериментального визначення деформацій (навантажень) металокопії, ми можемо визначити їх величину лише дискретно: у точках наклепки первинних перетворювачів (датчики опору – тензорезистори).

У свою чергу чисельний метод або комп'ютерний експеримент дадуть безперервний полія деформацій та навантажень по всьому розглянутому елементу.

Виходячи з розглянутих існуючих методів визначення НДС копії, скористаємося чисельним методом.

У практиці копіїванню вантажопідійомних машин не все навантаження є такими, що обчислюються. Частина з них визначається за емпіричними формулами (наприклад, зусилля від реборди колеса з головою рейки), а їх значення може лежати в досить широких діапазонах. У зв'язку з вищевикладеним, для перевірки відповідності розрахункової моделі ПКП його реальних умов навантаження, використовується експериментальний метод.

При коректно побудованій розрахунковій моделі, граничних умовах та прикладених навантаженнях необхідно, щоб дані про НДС, отримані чисельним та експериментальним методом збігалися в межах інженерної похибки.

На початковому етапі дослідження мета розрахунку не саме визначення НДС, а знаходження небезпечних місць металокопії ПКП (прольотної будови), які можуть бути осередками деформацій і руйнування. В подальшому в цих місцях будуть проводитися заміри параметрів

напружено-деформованого стану та за ними буде зроблено висновок про стан металокопії ПКП.

В роботі використовується математичний апарат механіки деформованого твердого тіла та основні залежності теорії пружності.

Звід основних рівнянь механіки – це сукупність трьох груп рівнянь: статичних, геометричних та фізичних:

1. Рівняння статики.

У цю групу входять диференціальні рівняння рівноваги всередині тіла (рівняння Нав'є):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X &= 0; \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y &= 0; \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Та умови на поверхні (статичні граничні умови):

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x l + \tau_{xy} m + \tau_{xz} n - \bar{X} &= 0; \\ \tau_{yx} l + \sigma_y m + \tau_{yz} n - \bar{Y} &= 0; \\ \tau_{zx} l + \tau_{zy} m + \sigma_z n - \bar{Z} &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де X, Y, Z – об'ємні сили;

$\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$ – сили на поверхні.

2. Геометричні рівняння.

Це рівняння Коші, які встановлюють зв'язок між деформаціями та переміщеннями:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\partial U}{\partial x}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x}; \\ \epsilon_y &= \frac{\partial V}{\partial y}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y}; \\ \epsilon_z &= \frac{\partial W}{\partial z}, \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial z}; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Та рівняння спільності деформацій, які часто називають тотожністю Сен-Венана:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y}; \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{xz}}{\partial x \partial z}; \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial y^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{yz}}{\partial y \partial z}; \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} - \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} \right) &= \frac{2\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y \partial z}; \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} - \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} \right) &= \frac{2\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x \partial z}; \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(-\frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} \right) &= \frac{2\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x \partial y}. \end{aligned} \right\} \quad 4)$$

3. Фізичні рівняння.

Це рівняння узагальненого закону Гука в прямій формі:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)], \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}; \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)], \quad \gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G}; \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)], \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}; \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

або у формі Ляме (зворотна форма):

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= 2G\varepsilon_x + \lambda\Delta, \quad \tau_{xy} = G\gamma_{xy}; \\ \sigma_y &= 2G\varepsilon_y + \lambda\Delta, \quad \tau_{xz} = G\gamma_{xz}; \\ \sigma_z &= 2G\varepsilon_z + \lambda\Delta, \quad \tau_{yz} = G\gamma_{yz}; \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\text{де } \Delta = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z, \quad \lambda = \frac{2\mu G}{1 - 2\mu}.$$

Стосовно використання методу скінченних елементів можна виділити два етапи дослідження конструкції: на першому етапі виконується декомпозиція вихідної системи на кінцеві елементи та вивчається поведінка кожного елемента, а на другому етапі виконується синтез системи рівнянь для описання досліджуваного об'єкту.

На першому етапі скінченно-елементної апроксимації виводяться залежності між силами і переміщеннями на границі елемента через залежності між силами і переміщеннями всередині окремого елемента.

Другий етап полягає у використанні залежностей між параметрами елементів на їхніх гра-

ницах для побудови системи рівнянь, що описують поведінку всієї конструкції.

В існуючих на сьогоднішній день програмах виконання цих етапів є автоматизованим, але не є автоматичним. Необхідний діалог користувача з програмою, потрібні додаткові математичні моделі досліджуваних об'єктів і нові програмні процедури, що органічно поєднуються з використовуваним пакетом.

Математична модель розглянутої металоко-нструкції крана описується системою рівнянь

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & \dots & k_{1,3n} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & \dots & k_{2,3n} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & \dots & k_{3,3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{3n,1} & k_{3n,2} & k_{3n,3} & \dots & k_{3n,3n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ V_1 \\ W_1 \\ \vdots \\ U_n \\ V_n \\ W_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_1 \\ F_1 \\ \vdots \\ F_n \\ F_n \\ F_n \end{bmatrix}, \quad (7)$$

або

$$\bar{K} \bar{U} = \bar{F}, \quad (8)$$

де k_{ij} – матриця жорсткості кінцевого елемента в локальній системі координат;

F_i – навантаження, прикладене до вузла з позначкою i моделі;

U_i, V_i, W_i – переміщення в вузлі з позначкою i за трьома взаємно перпендикулярними напрямками;

\bar{K} – глобальна матриця жорсткості.

Визначення граничних умов (навантаження та закріплення), що використовуються при розрахунку металоко-нструкції ПКП.

Геометрія моделі

Моделювання всієї металоко-нструкції ПКП виконано на основі робочих креслень наданих замовником.

Побудована модель апроксимована балочними кінцевими елементами. Геометрія балкових елементів визначалася становищем центрів тяжіння поперечних перерізів елементів ПКП. Для апроксимації обраний стандартний кінцевий елемент з бібліотеки програм розрахункової багатопільової програми – Beam 189 (рис. 1).

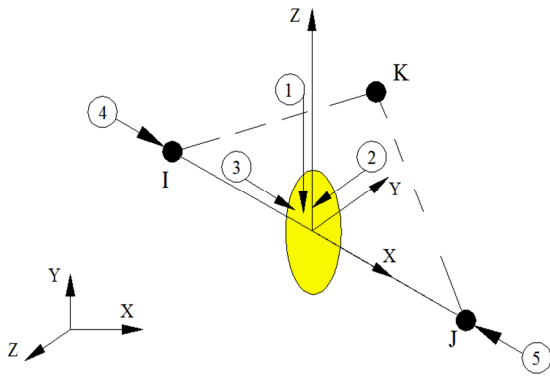


Рисунок 1 – Скінченний елемент Beam 189

Елемент має шість ступенів свободи в кожному вузлі – переміщення в напрямках осей X, Y, Z вузлової системи координат та кути поворотів навколо цих осей.

Побудована кінцево-елементна модель несучої системи ПКП, яка складається з 862 елементів та 1045 вузлів. При розбитті на кінцеві елементи використано впорядковану побудову сітки скінчених елементів. Для побудови моделі балочними елементами сформовано 32 оригінальних поперечних перерізи, у відповідності з особливостями конструкції, а також 27 стандартних поперечних перерізів з бібліотеки програми кінцево-елементного аналізу.

Для імітації закріплень в точках шарнірних з'єднань елементів ПКП використовувався масовий елемент MASS21. Це точковий елемент, який має шість ступенів свободи – три лінійних переміщення та три кути повороту, а також нульову масу (рис. 2).

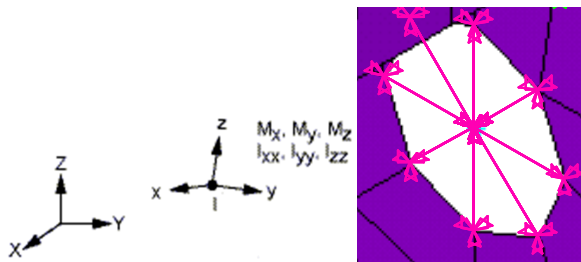


Рисунок 2 – Точковий елемент MASS21

Граничні умови

При розрахунку металевих конструкцій враховують всі діючі на них навантаження, а саме:

- постійні й рухливі;
- вітрові;
- навантаження від крутіння.

До постійних навантажень відносяться:

- вага металоконструкції ПКП;

- вага частин ПКП, пов'язаних з металоконструкцією.

Навантаження від ваги конструкції приймається розподіленим по довжині несучих елементів, а навантаження від ваги частин ПКП пов'язаних з металоконструкцією, приймаються як зосереджені сили.

Допустимі навантаження приймаються в залежності від розрахункової комбінації і від маркі сталі, з якої виготовлена металоконструкція.

У нашому випадку для сталі 09 Г 2 С-12 – $[\sigma] = 180 \text{ МПа}$.

На основі аналізу реальної конструкції контейнерного перевантажувача, в розрахунковій схемі основу закріплено шарнірно, а також за допомогою шарнірів з'єднано складові несучої системи.

Програма що реалізує МСЕ дозволяє в результаті розрахунків отримати практично всі необхідні параметри напружено-деформованого стану (НДС) конструкції: напруження та деформації в напрямках координатних осей, головне напруження і відповідні деформації, еквівалентні напруження за гіпотезою Губера-Мізеса, переміщення всіх точок конструкції та цілий ряд інших величин.

В роботі проведені розрахунки різних варіантів навантаження металоконструкції ПКП та отримані необхідні для аналізу міцності і жорсткості параметри.

Для розрахункової моделі використано випадок, якому відповідають максимальні навантаження робочого стану (рис. 3 – 6).

Сюди входять:

- вагові навантаження від номінального вантажу;
- вага металоконструкції;
- максимальні навантаження від тиску вітру;
- інерційні навантаження від відхилення вантажу від вертикалі;
- навантаження, викликані перекосом крана в процесі роботи;
- навантаження від позакентрового положення кабіни оператора.

Результати комп'ютерного експерименту наведені на рисунках 4 – 6. Вантажний візок з боку моря (між відтяжкою і кінцевим перерізом) на консольній частині.

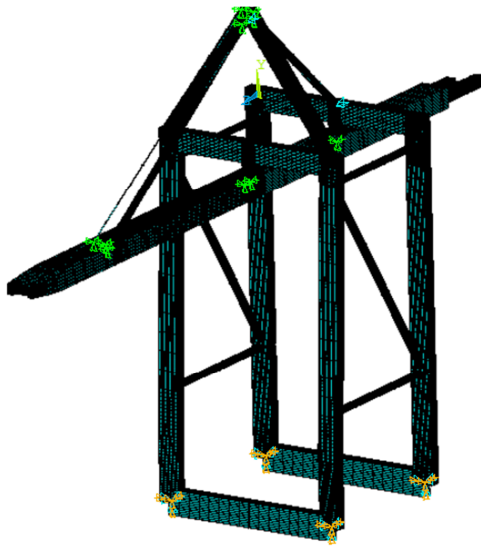


Рисунок 3 – Математична модель причального контейнерного перевантажувача

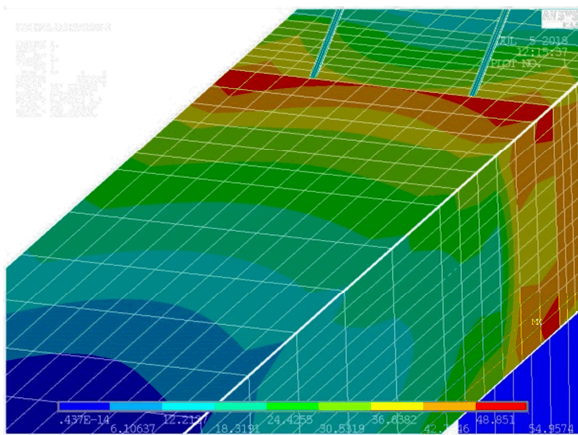


Рисунок 4 – Еквівалентні напруження в стрілі ПКП

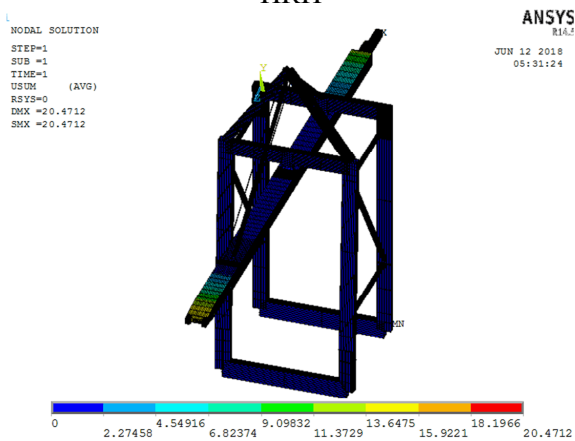


Рисунок 5 – Сумарні переміщення в металоконструкції порталу.

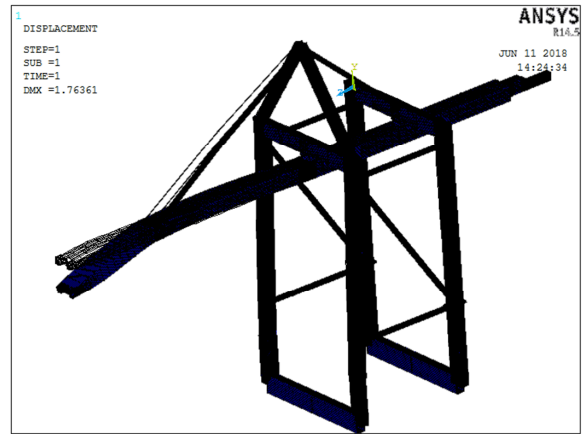


Рисунок 6 – Деформована форма металоконструкції ПКП (збільшений масштаб деформації)

Визначення параметрів напружено-деформованого стану дозволило визначити найбільш небезпечні ділянки в металоконструкції ПКП та, відповідно, точки розташування тензодатчиків опору для проведення натурного експерименту.

Аналіз результатів дозволяє зробити висновок, що досліджувана модель крана працездатна, тому, що отримані значення параметрів напружено-деформованого стану знаходяться в допустимих межах.

Найбільші напруження виникають в характерних перерізах прольотної будови (стріла та тилова частина).

За допомогою комп'ютерної реалізації чисельного методу розрахунку МСЕ вдалося провести комп'ютерний експеримент та розглянути конструкцію ПКП при різних варіантах навантаження, а також визначити місця небезпечних перерізів для проведення натурного експерименту.

Результати експерименту та розрахунку зведені в таблицю 1.

Похибка результатів чисельного та експериментального дослідження небезпечних точок металоконструкції ПКП знаходиться в межах інженерної похибки 5 %, що свідчить про коректний вибір граничних умов і методики дослідження.

Використовуючи дані числового та натурного експериментів, визначаємо залишковий ресурс роботи металоконструкції ПКП.

Необхідні дані про попередню експлуатацію крана, представлені замовником.

Таблиця 1 – Порівняння абсолютних значень напружень

Точка	Датчик	Нормальні напруження за даними розрахунку МСЕ, МПа	Нормальні напруження за даними натурного експерименту ПКП, МПа
1	5	50,0341	46,9
	6	4,8546	4,6
	7	6,7669	6,46
2	8	36,4202	34,86
	9	2,3427	2,2
	10	17,5643	16,8
3	11	38,7679	36,8
	12	6,3324	6,1
	13	22,3529	21,2
4	14	26,6867	24,97
	15	4,3321	4,3
	16	5,3415	5,1

ПКП – кран експлуатується 29 років.

Число робочих циклів за час роботи перевантажувача визначається за формулою

$$N = T \cdot \tau \cdot t \cdot n = 8,874 \cdot 10^5 \text{ циклів,} \quad (9)$$

де $T = 29$ – кількість років роботи;

$\tau = 170$ – кількість робочих днів в році;

$t = 10$ – кількість годин роботи на добу;

$n = 18$ – кількість робочих циклів в годину.

Згідно ISO 4301/1 та ГОСТ 25546-82 клас використання перевантажувача відповідає С6.

Фактичний клас навантаження відповідно до ISO 4301/1 та ГОСТ 25546-82 розраховується за формулою (6.27):

$$Kp = \sum \left[C_i / C_T (P_i / P_{\max})^3 \right], \quad (10)$$

$$Kp = 0,347.$$

У відповідності з ISO 4301/1 та ГОСТ 25546-82 при класі навантаження Q3 та класі використання С6 група режиму роботи перевантажувача буде 7К; А7.

Відповідно до довідки про характер роботи ПКП – середня маса одного підйому 19,39 тонн.

Розрахунок залишкового ресурсу металокопункції перевантажувача (ПКП) відповідно до умов експлуатації крана:

$$\Phi = \frac{N_1}{N_{\text{год}}} \cdot K_{\text{II}} \cdot K_{\text{Д}} \cdot K_{\text{ср}}, \text{ роки} \quad (11)$$

де $N_1 = (N - N_{\text{нар}}) \cdot \lambda \cdot K_{\text{H}} = 4,673 \cdot 10^5$ – циклів;

$N = 2 \cdot 10^6$ – середній ресурс в циклах навантаження;

$N_{\text{ф}} = 8,874 \cdot 10^5$ – розрахункове напрацювання крана в циклах навантаження;

$\lambda = 0,7$ – коефіцієнт періоду зародження тріщини;

$K_{\text{H}} = 0,6$ – коефіцієнт нерегулярності навантаження металокопункції

$T = 3,33$ – тривалість роботи крана в хв.,

$D_k = 365$ – кількість календарних днів в році;

$k = 0,42$ – коефіцієнт використання крана за часом;

$K_{\text{II}} = 0,8$ – коефіцієнт ушкодження металокопункції; $K_{\text{Д}} = 0,8$ – коефіцієнт динамічного навантаження металокопункції; $K_{\text{ср}} = 0,9$ – коефіцієнт агресивності середовища експлуатації крана.

Залишковий ресурс для металокопункції крана ПКП – $\Phi = 8,72$ роки, за умови збереження поточного режиму експлуатації ПКП.

За кривої втоми [6] визначимо число циклів до руйнування вузла в зоні найбільших еквівалентних напружень (з'єднання відтягнення і стріли) при фактичних умовах навантаження ПКП $\sigma_{\text{Е}}^{\text{МІЗЕС}} = 46,1 \text{ МПа}$:

$$(\sigma_{\text{Е}}^{\text{МІЗЕС}})^m \cdot N_2 = \sigma_{-1\text{К}} \cdot N_0, \quad (12)$$

де N_2 – число циклів до руйнування.

Число циклів до руйнування:

$$N_2 = N_0 \left(\frac{\sigma_{-1\text{К}}}{\sigma_{\text{Е}}^{\text{МІЗЕС}}} \right)^m = 308505,75 \text{ циклів.} \quad (13)$$

Кількість циклів роботи крана для постійної регулярної інтенсивної роботи крана $N_{\text{К}} = 2 \cdot 10^5$ циклів.

Визначимо число циклів до руйнування вузла з'єднання відтягнення і стріли при фактичних напруженнях:

$$N_1 = N_0 \left(\frac{\sigma_{-1K}}{\sigma_{ekv}} \right)^m = 15,8 \cdot 10^5 \text{ циклів.} \quad (14)$$

За 29 років роботи ПКП було напрацьовано кількість циклів $N = 8,874 \cdot 10^5$.

Для визначення залишкового ресурсу металокопункції крана скористаємося лінійною гіпотезою накопичення пошкоджень.

Визначимо ресурс металокопункції крана при роботі з підвищеними напруженнями:

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2 + n_p}{N_2} = 1, \quad (15)$$

$$n_p = \left(1 - \frac{n_1}{N_1} \right) \cdot N_2 - n_2 = 107026,9 \text{ циклів,}$$

де n_p – ресурс металокопункції, цикли.

При підвищеному навантаженні на кран ресурс експлуатації випадку складе 6,12 років.

Ресурс роботи крану з фактичним навантаженням:

$$\frac{n_1 + n_p}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} = 1, \quad (16)$$

$$n_p = \left(1 - \frac{n_1}{N_1} \right) \cdot N_2 - n_2 = 158372,2146$$

При заданих умовах експлуатації залишковий ресурс остаточно складе 8,72 роки.

Висновки

Підхід до вирішення даного завдання може бути застосований до більшості типів вантажопідіймальних машин, що знаходяться в експлуатації в різних галузях народного господарства України.

В роботі проведено аналіз технологічного процесу перевантаження вантажів, що обробляються за допомогою ПКП. Визначено фактичний стан металевих копункцій ПКП. Розглянуто існуючі, найбільш поширені методики розрахунку залишкового ресурсу копункцій. Виконано типові розрахунки за нормальними напруженнями. Розроблено комп'ютерну модель металокопункції крана за допомогою математичного апарату методу скінченних елементів. Проведено комп'ютерний експеримент та розглянуто копункцію ПКП при різних варіантах навантаження, а також визначено небезпечні перерізи та області для проведення натурального експерименту. Для натурального експерименту застосовано метод тензометрії, який є одним з найбільш ефективних методів експериментального визначення полів деформацій та напружень в натурних копунк-

ціях. Визначено залишковий ресурс роботи металокопункції підйомно-транспортної машини.

Список використаних джерел

1. Калініченко П. М. Напружений стан товстостінного циліндра з концентраторами / П. М. Калініченко, О. М. Лимаренко, Ю. В. Зяблов // Праці Одеського політехнічного університету. – 2006. – № 2(26). – С. 20 – 23.
2. Оробей В. Ф. Применение численных методов к расчету элементов судовых конструкций / В. Ф. Оробей, А. О. Немчук, А. М. Лимаренко // Вісн. Одес. нац. морського ун-ту. – 2009. – № 26. – С. 85–90.
3. Кравчук В.С. Влияние конструктивно-технологических факторов на коэффициент запаса прочности поверхностно-упрочненных деталей машин / В. С. Кравчук, А. М. Лимаренко // Праці Одеського політехнічного університету. – 2006. – № 1 (25). – С. 14–17.
4. Limarenko A. M. The optimization of car engine piston-rod by numerical method. / A. M. Limarenko, V. V. Khamray, A. A. Druzhynin // Вісник Одеської державної академії будівництва і архітектури. – 2015. – Вип. 51, ч. 1. – С. 586–589.
5. Лимаренко А. М. Методика расчета рулевого управления с применением модуля программы Solid Works / А. М. Лимаренко, В. В. Хамрай А.А. Дашенко // Материали 9 международной научно-практической конференции «Современные исследования и развитие», Болгария, София, 2015. – Том 16. – С. 11-13.
6. Баженов В. А. Численные методы в механике / В. А. Баженов, А. Ф. Дашенко, Л. В. Коломиец, В. Ф. Оробей, Н. Г. Сурьянинов. – Одесса: «Стандартъ», 2005. – 564 с.
7. Оробей В. Ф. Расчет арок на устойчивость методом граничных элементов / В. Ф. Оробей, А. Ф. Дашенко, А. М. Лимаренко // Проблеми техніки. – Одеса, 2009. – № 2. – С. 114–123.
8. Orobej V. Boundary element method in problem of plate elements bending of engineering structures [Text] / V. Orobej, L. Kolomiets, A. Lymarenko // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 4. – P. 295–302.
9. Orobej V. Mathematical modeling of the stressed-deformed state of circular arches of specialized cranes[Text] / V. Orobej, O. Daschenko, L. Kolomiets, O. Lymarenko, Y. Ovcharov // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – 5/8(89). – P. 4–11.
10. Orobej V. Stability of structural elements of special lifting mechanisms in the form of circular arches[Text] / V. Orobej, O. Daschenko,

L. Kolomiets, O. Lymarenko // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – 2/7(92). – P. 4–10.

References

1. Kalinichenko P. M. Napruzheniy stan tovstostinnoho tsylindra z kontsentratoramy / P. M. Kalinichenko, O. M. Lymarenko, Yu. V. Ziablov // Pratsi Odeskoho politekhnichnoho universytetu. – 2006. – # 2(26). – S. 20 – 23.

2. Orobej V. F. Primenenie chislennykh metodov k raschetu e'lementov sudovykh konstrukcij / V. F. Orobej, A. O. Nemchuk, A. M. Limarenko // Visn. Odes. nats. morskoho un-tu. – 2009. – № 26. – S. 85–90.

3. Kravchuk V.S. Effect of constructive and technological factors on stock Factor prochnosti surface-uprochneniya machine parts / V.S. Kravchuk A. M. Limarenko // Proceedings Odessa Polytechnic University. – 2006. – № 1 (25). – S. 14–17.

4. Limarenko A.M. The optimization of car engine piston-rod by numerical method. / A. M. Limarenko, V. V. Khamray, A. A. Druzhynin // Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva i arkhitektury. – 2015. – Vyp. 51, ch. 1. – S. 586–589.

5. Limarenko A.M. Metodika rascheta rulevogo upravleniya s primeneniem modulay programy Solid Works. / A. M. Limarenko, V. V. Khamray, A. A. Dashchenko // Materialy 9 megdunarodnoy

nauchno-prakticheskoy konferencii «Sovremennye issledovaniya i razvitiya», Bolgaria, Sofia, 2015. – Tom 16. – S. 11-13.

6. Bazhenov V. A. Chislennyye metody v mexanike / V. A. Bazhenov, A. F. Dashhenko, L. V. Kolomiec, V. F. Orobej, N. G. Sur'yaninov. – Odessa: "Standart", 2005. – 564 s.

7. Orobej V. F. Raschet arok na ustojchivost' metodom granichnykh e'lementov / V. F. Orobej, A. F. Dashhenko, A. M. Limarenko // Problemy tekhniki. – Odesa, 2009. – # 2. – S. 114–123.

8. Orobej V. Boundary element method in problem of plate elements bending of engineering structures [Text] / V. Orobej, L. Kolomiets, A. Lymarenko // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 4. – P. 295–302.

9. Orobej V. Mathematical modeling of the stressed-deformed state of circular arches of specialized cranes[Text] / V. Orobej, O. Daschenko, L. Kolomiets, O. Lymarenko, Y. Ovcharov // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – 5/8(89). – P. 4–11.

10. Orobej V. Stability of structural elements of special lifting mechanisms in the form of circular arches[Text] / V. Orobej, O. Daschenko, L. Kolomiets, O. Lymarenko // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – 2/7(92). – P. 4–10.

Надійшла до редакції 15.07.2018