

8. Пат. 23839 Україна, МПК Е 02D 29/02. Підпірна стінка: 23839 Україна, МПК Е 02D 29/02 Тімченко Р.О., Крішко Д.А., Муненко А.М., Ківа М.В., Литвиненко О.С. (Україна). – № у 2007 00594; Заявл. 22.01.2012; Опубл. 11.06.2012, Бюл. № 8. – 4 с.

9. Пат. 8669 Україна, МПК Е 02D 27/00. Підпірна стінка для зсувних територій: 8669 Україна МПК Е 02D 27/00 Тімченко Р.О., Вілкул Ю.Г., Терещенко Р.Я., Кочергін П.С. (Україна). – № у 200501025; Заявл. 04.02.2005; Опубл. 15.08.2005, Бюл. № 8. – 4 с

10. Тімченко Р. О. Обґрунтування вибору лінійної моделі регресії у плануванні експерименту для вирішення поставленого експериментального завдання / Р. О. Тімченко, Д. А. Крішко, Л. В. Кадол, В. О. Савенко // Містобудування та територіальне планування – К.: КНУБА, 2016. – Вип. 59 – С. 425-431.

11. Тімченко Р. А. Оптимизация конструктивного решения подпорной стены специального типа на основании линейной модели регрессии / Р. А. Тімченко., Д. А. Крішко, В. О. Савенко // Вісник КНУ. – Кривий Ріг: КНУ, 2016. – Вип. 41. – С. 54-58.

12. Тімченко Р. О. Застосування програм заснованих на методі скінченних елементів (МСЕ) для моделювання роботи системи «основа-інженерна споруда» / Р. О. Тімченко, Д. А. Крішко, В. О. Савенко // Строительство, материаловедение, машиностроение (сб. научн. трудов). – Д., ГВУЗ ПГАСА, 2016. – С. 143-148.

13. Особенности конструктивного решения массивной подпорной стенки для неблагоприятных территорий / Р. А Тімченко, Д. А. Крішко, О. В. Субота, О. С. Мокшина //Вісник КТУ. – Кривий Ріг: КТУ, 2007. – Вип. 16. – С. 136-139.

Рукопис подано до редакції 19.03.17

УДК 621.874

С.І. САХНО, Л.О. ЯНОВА, О.В. ПИЩИКОВА, кандидати техн. наук, доц.
Криворізький національний університет

АНАЛІЗ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ МОСТОВОГО КРАНА МЕТОДОМ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Мета. Знаходження вразливих місць в конструкції мостових кранів, що вичерпали ресурс експлуатації шляхом дослідження напруженого стану конструкції методом кінцевих елементів.

Методи досліджень. Для дослідження напруженого стану в конструкції, розроблена математична твердотільна модель. Для розробки моделі використані креслення досліджуваного крана і реальні навантаження що ним сприймаються. Дослідження моделі виконувалось в SolidWorks корпорації Dassault Systemes. На даному етапі досліджень враховувались статичні навантаження.

Результати. Розроблена твердотільна математична модель крана для дослідження впливу зовнішніх факторів на напружений стан конструкції. Запропонована методика дослідження дозволяє швидко і з незначними витратами виявити найбільш суттєві фактори, що можуть впливати на рівень безпечної експлуатації крана. Наведені результати впливу зовнішніх статичних навантажень на напружений стан в елементах конструкції, прогини конструкції та її власні частоти.

Наукова новизна. В результаті досліджень набуло подальшого розвитку застосування методу кінцевих елементів для запобігання критичних станів кранових конструкцій, що вичерпали ресурс експлуатації.

Практична значимість. Запропонована методика дає можливість більш точно і з меншими витратами прогнозувати надійність кранових конструкцій, що вичерпали ресурс експлуатації.

Ключові слова: мостовий кран, метод кінцевих елементів, САПР, надійність конструкції крану.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. На підприємствах України і сьогодні експлуатується велика кількість мостових кранів, що випрацювали свій ресурс та були виготовлені більш ніж 30-60 років тому [1]. Особливістю цих кранів є те, що при їх проектуванні та виготовленні використовувались методи та матеріали, що не відповідають сучасним вимогам. Зокрема, застосовувались конструктивні рішення, які призводили до підвищеної концентрації напружень в конструкції, а в якості матеріалів застосовувались низькоякісні сталі схильні до крихкого руйнування [2]. Недосконалість методів розрахунків і матеріалів примушувало розробників приймати завищені коефіцієнти запасу міцності, що з одного боку збільшувало надійність конструкції, а з іншого - значно збільшувало її вагу і власні прогини.

Тим не менш, враховуючи скрутний фінансовий стан більшості підприємств України, на багатьох з них продовжується експлуатація застарілої техніки, що час від часу приводе до аварій і навіть людських жертв. Зрозуміло, що в цих умовах експлуатація застарілих кранів

можлива лише за умов, що відома точна картина розподілення напружень в конструкції і ці напруження не перевищують граничних станів при комбінації самих несприятливих факторів.

Методики дослідження конструкцій, що застосовуються в даний час, не дозволяють безпосередньо виміряти напруження, що виникають при роботі конструкції. Вразливість тих чи інших елементів, як правило, виявляється тільки після їх руйнування. Однак метод кінцевих елементів дозволяє створити математичну твердотільну модель крана, що досліджується. При наявності точних креслень конструкції та характеристик матеріалів, що в ній застосовується, з'являється можливість спрогнозувати найбільш вірогідні місця руйнування крану, та виявити сполучення факторів, при яких такі руйнування можливі.

Аналіз досліджень і публікацій. Можливість використання методу кінцевих елементів для дослідження напруженого стану кранових конструкцій розглядалася як в Україні [3], так і за кордоном [4-8]. Частина [3-5] досліджень було націлено на виявлення самої можливості використання методу кінцевих елементів для моделювання напружених станів в кранових конструкціях, а також на пошук оптимальних методів моделювання конструкцій. Іншу частину досліджень [6-8] було спрямовано на оптимізацію конструкції кранів з метою зниження її металоємності і підвищення жорсткості на стадії проектування.

Постановка завдання. Для України більш актуальним є дослідження напруженого стану конструкцій кранів, що вичерпали експлуатаційний ресурс з метою забезпечення їх гарантованої надійної і безпечної роботи.

У зв'язку з цим у даному дослідженні поставлено завдання створення математичної моделі реального крана, що працює за його кресленнями і дослідження його напруженого стану методом кінцевих елементів.

Дослідження повинні виявити найбільш небезпечні місця конструкції і чинники здатні сприяти її руйнуванню. На даному етапі досліджень розглядаються тільки статичні впливи на конструкцію.

Викладення матеріалу та результати. Об'єкт досліджень - двобалочний мостовий кран вантажопідйомністю 10 т, що застосовується на підприємствах Криворізького басейну. Кранові балки мають коробчастий перетин і зварені з сталевого листа.

Для забезпечення геометричної стійкості стінок усередині короба приварені великі діафрагми, а для рівномірної передачі навантаження від підвізкової рейки на стінки всередині короба приварені малі діафрагми. Конструкція крана також включає кінцеві балки і вантажний візок.

Для спрощення розрахунків, на даному етапі досліджень в конструкцію не включені галереї.

Основні характеристики крана наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Основні характеристики мостового крана

Характеристики	Значення
Візок	
Вантажопідйомність нетто головного підйому	10 т
Висота головного підйому	10 м
кратність поліспасти головного підйому	3
Геометричні параметри крана	
база	4,9 м
проліт	28,6 м
Установчі розміри крана й візка	
база візка	1,485 м
колія візка	2,0 м
висота крана від рівня головки рейки	2,31 м

Геометрична модель. Для проведення аналізу методом кінцевих елементів геометрична модель крана була виконана відповідно до технічної документації на кран мостовий електричний УХЛ1.

Модель виконана в системі SolidWorks корпорації Dassault Systemes.

На рис. 1 показано основні елементи досліджуваного мостового крана.



Рис. 1. Геометрична модель: *а* - тестований мостовий кран, *б* - візок мостового крана

У табл. 2 наведено маси основних елементів крана.

Таблиця 2

Маси основних елементів крана

Елемент	Значення, т
Загальна маса крана	39,89
Маса головної балки	14,48
Маса кінцевої балки	1,99
Маса вантажного візка	4,97

Досліджуваний кран має коробчасту конструкцію, в якій в якій один розмір (товщина стінок) істотно нижче інших. Даний тип конструкції має найменшу загальну висоту моста і велику втомну міцність.

Оскільки товщина стінок значно менше, ніж інші розміри, цифрова твердотільна модель була побудована такою що складається переважно з листових елементів.

Модель представлено 261 компонентами, 38 з яких є унікальними (є основою для клонування інших компонентів).

Особливості створення моделі для аналізу методом кінцевих елементів. Достовірні результати досліджень напруженого стану, переміщень і частоти власних коливань можуть бути досягнуті за умови застосування в моделі матеріалів з характеристиками, що відповідають реальним матеріалам, реальних навантажень і при призначенні правильних кріплень елементів крана.

З огляду на те, що більшість елементів конструкції крана виготовлено з конструкційної сталі Ст3 (табл. 3), для листових елементів головних і кінцевих балок в якості матеріалу також прийнята сталь Ст3 з наступними характеристиками (табл. 3).

Таблиця 3

Дані про матеріал, який використано в обчисленнях для листових виробів

Властивість	Позначення	Значення
Модуль пружності	E	210×103 Н/мм ²
Коефіцієнт Пуассона	ν	0,28
Масова щільність	ρ	7800 кг/м ³
Межа плинності	σ	235 Н/мм ²

У статичних дослідженнях навантаження на кран складаються з навантажень від власної ваги крана і навантаження від ваги вантажу. Вага твердотільної моделі крана становить 21,32 т. Вага крана - прототипу по паспорту становить 39,89 т. Різниця у вазі моделі і прототипу виникає через відсутність в моделі механізмів, галерей, ремонтного майданчику та інших навісних елементів. Компенсація різниці у вазі прототипу і моделі проведена за рахунок введення в модель розподіленої маси: 1227 кг на опорну плиту вантажного візка і по 8152 кг на зовнішні бокові листи головних балок.

Вага вантажу враховується прикладанням дистанційного навантаження 10000 кг до вантажного візка. Дистанційне навантаження розташоване на відстані 5 м нижче від місця жорсткого кріплення.

Схему прикладання навантажень показано на рис. 2

В якості глобального прийнятий тип контакту «Пов'язані» з параметром «Несумісна сітка». Для забезпечення достовірності розрахунків, зв'язок між елементами конструкції крана та рейками реалізовано за рахунок введення в твердотільну модель віртуальних площин, геометрія розташування яких відповідає геометрії розташування контакту між колесами і рейками.

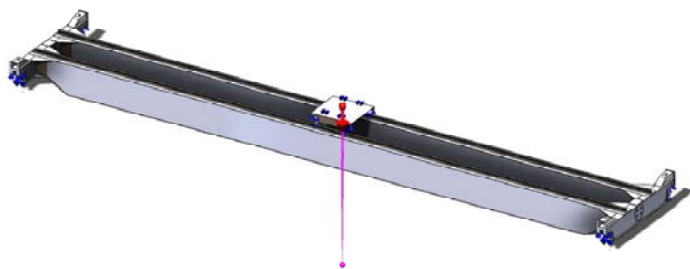


Рис. 2 Схема докладання зовнішніх навантажень

Для моделювання контакту між рейкою і колесом крана площина має форму трикутника з вершиною, що розташована в точці контакту рейки і колеса. Лінію контакту між колесом вантажного візка і рейкою змодельовано площиною, що має форму прямокутника. Між відповідними площинами та місцями кріплення букс встановлено з'єднання типу «жорсткий зв'язок».

Площини, що моделюють контакт між колесами крана і рейкою мають кріплення «Довідкова геометрія» з вільним обертанням навколо відповідних місць кріплення. Для одного з приводних коліс задане обмеження переміщення по всім осям, для іншого - вздовж рейки та в вертикальній площині, для неприводних коліс - обмеження переміщень накладено лише в вертикальній площині, рис. 3.

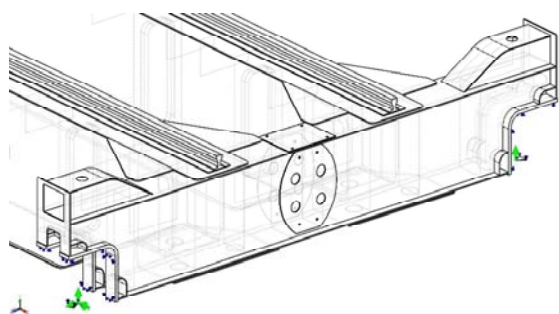


Рис. 3 Схема кріплень моделі

Розрахунок напруженого стану і переміщень.

Перед розрахунком напруженого стану була розрахована сітка моделі, рис. 4.

При створенні сітки були використані наступні параметри: сітка на основі змішаної кривизни, максимальний розмір елемента - 190 мм, мінімальний розмір елемента - 7,65 мм, мінімальне число елементів в окружності - 8, співвідношення збільшення розміру елемента - 1,6.

У дослідженні прораховувалося 255 363 вузлів і 116 052 елементів.

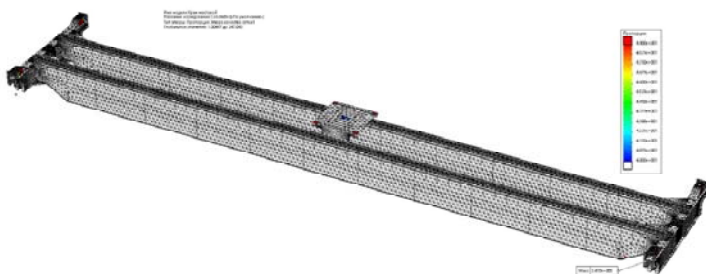


Рис. 4 Епюра якості сітки

В результаті аналізу були визначені місця концентрації напружень в конструкції, максимальні деформації і параметри власних коливань крана.

Максимальний статичний прогин головної балки в центрі прольоту під дією власної ваги становить 24,0

мм, від власної ваги і ваги вантажу 10т складає 31,6 мм, рис. 5, що менше допустимого $28600/600 = 47,6$ мм.

Аналіз показав, що досліджувана конструкція крана має високий запас міцності

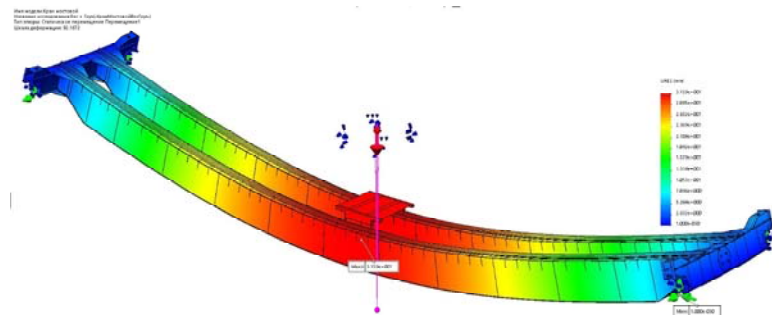


Рис. 5 Епюра переміщень мостового крана при спільному впливі власної ваги і ваги вантажу

Максимальна напруги в середній частині не завантаженого крана становить $\sigma=37,07$ МПа, завантаженого вантажем 10 000 кг – 66,88 МПа, рис. 6.

Найбільші напруження в завантаженій конструкції

складають 96,14 МПа і знаходяться в місці примикання зовнішньої (по відношенню до головної балки) стінки кінцевої балки до надбуксового листа.

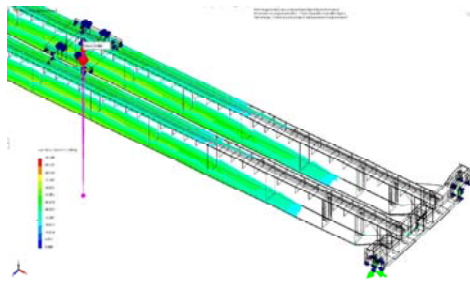


Рис. 6 Розподіл напружень в головній балці. Епюра Iso з нижнім порогом напруженьг 30 МПа

Визначення власних частот. Частотний аналіз - дозволяє здійснювати розрахунок власних частот конструкції та відповідних форм коливань. При збігу власних частот з частотами впливів зовнішніх зусиль в конструкції виникає явище резонансу, яке часто веде до передчасного руйнування найбільш резонуючих елементів. Для запобігання резонансу,

конструкція повинна мати власні частоти, розташовані в нижчій області, ніж частоти збуджуючих зусиль. Для обчислення власних коливань використовувалася рішальна програма FFEPlus. Розраховувалися перші 6 частот власних коливань крана без вантажу та з вантажем. Результати досліджень наведено в табл. 4-6.

Таблиця 4

Список власних частот мостового крана

Номер режиму	f, Герц	
	конструкція без вантажу	конструкція з вантажем
1	2,8244	2,9883
2	3,7283	3,0316
3	4,8225	3,835
4	6,2857	6,3515
5	8,5768	8,7684
6	9,1286	9,1296

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок, що найбільш значущими є коливання уздовж осі Y (вертикальна вісь) і осі Z (уздовж підкранової балки). Коливання уздовж осі X (уздовж головної балки) істотні тільки на частоті 3,83 Гц. По осі Y найбільший масовий вплив має частота 3,03 Гц, по осі Z = 2,98 Гц.

Таблиця 5

Масова участь моделі в коливаннях щодо осей локальної системи координат (конструкція без вантажу)

Номер режиму	Частота, Гц	Напряг X	Напряг Y	Напряг Z
1	2,8244	0,018701	4,4537e-007	0,67763
2	3,7283	0,015267	0,76082	0,00027284
3	4,8225	0,86971	0,011703	0,0079799
4	6,2857	0,00019662	5,2563e-007	4,2417e-005
5	8,5768	0,0001223	2,0593e-007	1,1517e-007
6	9,1286	0,029764	4,1068e-005	6,3598e-006
		Сума X=0,93376	Сума Y=0,77256	Сума Z=0,68593

Таблиця 6

Масова участь моделі в коливаннях щодо осей локальної системи координат (конструкція з вантажем)

Номер режиму	Частота, Гц	Напряг X	Напряг Y	Напряг Z
1	2,9883	0,069874	0,062469	0,36831
2	3,0316	0,0013032	0,7358	0,039405
3	3,835	0,72902	0,010043	0,023924
4	6,3515	0,12187	0,00033852	0,00037539
5	8,7684	0,0015358	3,5804e-006	2,88e-011
6	9,1296	0,022679	6,6803e-005	7,9101e-006
		Сума X=0,9716	Сума Y=0,80873	Сума Z=0,74872

Висновки та напрямок подальших досліджень. Згідно існуючих методик для розрахунку металевих конструкцій мостових кранів та їх елементів використовують метод граничних станів, який встановлює дві групи граничних станів [9]:

по вичерпанню конструкцій крана несучої здатності;
по досягненні умов, що порушують нормальну експлуатацію крана.

До другої групи граничних станів відноситься і максимальний прогин конструкції.

Отримані в дослідженні результати дозволяють зробити висновок, що конструкція крана, що розглядалась має високий запас міцності.

При межі плинності 230 МПа, максимальні напруження в конструкції складають 96,14 МПа в місцях найбільшої концентрації напружень і 67 МПа в середній частині головної балки. Тобто запас міцності складає від 3,4 до 2,4.

У той же час запас жорсткості конструкції значно менший. При допустимому прогині конструкції 47,6 мм, при статичному завантаженні головна балка має прогин 31,6 мм. Тобто запас складає лише 1,5 одиниці.

Для забезпечення безпечної роботи конструкції важливі і отримані в дослідженні дані власних частот мостового крана.

Результати показують значну масову участь конструкції в коливаннях на частотах від 2,9 до 3,8 Гц. Згідно [10] саме такі збуджуючі частоти характерні для мостових кранів при підйомі та спуску вантажів.

Співпадання збуджуючих та власних частот може привести до резонансних явищ, що негативно вплинуть на параметри надійності та довговічності. Представлена модель може служити основою для подальших досліджень динамічних впливів на мостовий кран.

Отримані в роботі результати можуть бути використані для оптимізації конструкції крана, зменшенні його металоємності за рахунок зниження товщини елементів з низькими внутрішніми напруженнями.

Список літератури

1. Андриенко Н.Н. Куда идем, Куда поворачиваем? / Н.Н. Андриенко, В.Л. Корень, С.Я. Полнарв // Подъёмные сооружения. Специальная техника, 2011. – №7–8. – С. 21–28.
2. Акименко О.Ю. Логвинов И.Н. Аварии кранов из-за хрупких разрушений металлоконструкций [Журнал] // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). - Москва: ООО «Евразийское Научное Содружество», 2015. - 10-2 (19). - С. 75-76.
3. Прочностной анализ металлоконструкции грузоподъемных кранов с использованием solid works. // Вісник Приазовського державного технічного університету, 2013. – С. 196–203.,
4. Camelia B. P. Application of finite element method to an overhead crane bridge / B. P. Camelia, O. T. Gelu, A. Josan // Wseas transactions on applied and theoretical mechanics. – 2009. – С. 64–73.
5. Suratkar A. Design Optimization Of Overhead EOT Crane Box Girder Using Finite Element Analysis / A. Suratkar, V. Shukla, K. S. Zakiuddin // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2013. – С. 720–724
6. Haniszewski T. Strength analysis of overhead traveling crane with use of finite element method [Електронний ресурс] // Problemy transportu Volume 9 Issue 1. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: http://transportproblems.polsl.pl/pl/archiwum/2014/zeszyt1/2014t9z1_03.pdf.
7. Patel P. R. A Review on Structural Analysis of Overhead Crane Girder Using FEA Technique A Review on Structural Analysis of Overhead Crane Girder Using FEA Technique / P. R. Patel, V. K. Patel. // International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT). – 2013. – С. 41–44.
8. Dimensional optimization for the strength structure of a traveling crane / C. B. Pinca, G. O. Tirian, A. V. Socalici, e. D. Ardelean // wseas transactions on applied and theoretical mechanics. – 2009. – С. 147–156.
9. В.С. Котельников А.А. Зарецкий, А.Б. Макаров. Состояние расчетов кранов и основные направления их развития [Журнал] // Информационный бюллетень Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. – М. : 2007 г.. - 28. - стр. 67-75.
10. Haniszewski T. Overhead traveling crane vibration research using experimental wireless measuring system / T. Haniszewski, D. Gaska. // Transport problems. – 2013. – С. 57–66.