

***В. О. КОВАЛЕНКО, М. Б. СТРЕЛКОВ, В. В. СТРИЖАК, В. П. РУБАШКА,
О. В. ТУРЧИН, Г. О. ГНАТЕНКО***

ПЕРЕВІРКА РЕЗУЛЬТАТІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО СИНТЕЗУ ПЕРЕРІЗУ БАЛОК МОСТОВОГО КРАНУ ЗА КРИТЕРІЯМИ МІЦНОСТІ І ЖОРСТКОСТІ

В статті розглянуто порівняльний аналіз мостових кранів. Перший кран має головні балки, що відповідають конструкції серійного крану. В другому випадку – балки мають автоматично синтезований переріз. Для цього крану виконано визначення параметрів перерізу. Проведено моделювання та чисельний розрахунок міцності і жорсткості моста з балками обох конструкцій. Встановлено, що автоматизований синтез перерізу дозволяє створити конструкцію, яка відповідає вимогам безпечної роботи.

Ключові слова: мостовий кран, головна балка, переріз, FEM, FEA.

***V. KOVALENKO, M. STRELKOV, V. RUBASHKA, V. STRYZHAK; O. TURCHYN,
G. GNATENKO***

VERIFICATION OF THE RESULTS OF AUTOMATED SYNTHESIS OF CRANE BEAM CROSS-SECTIONS BY STRENGTH AND STIFFNESS CRITERIA

The article considers a comparative analysis of bridge cranes. The first crane has main beams that correspond to the design of a serial crane. In the second case, the beams have an automatically synthesized cross-section. A calculation scheme has been drawn up for the bridge crane and the loads have been determined according to European EN standards. For the design of the serial crane, the cross-section dimensions have been determined in accordance with the design documentation. A 3D model has been created based on these data and a numerical calculation of the strength and stiffness of the bridge has been performed. For comparative analysis, the dimensions of the beam cross-section elements have been determined based on statistical regularities and the initial data of the serial crane (load capacity, span, operating mode group), on the basis of which a 3D model of the crane bridge with an automatically synthesized cross-section has been created. For the bridge with an automatically synthesized cross-section, a check of compliance with the strength and stiffness conditions has also been performed. Comparison of the obtained data makes it possible to assess the discrepancy between the safety margins of the serial crane and the synthesized one. It has been established that automated cross-section synthesis allows for the creation of a design that meets the requirements of safe operation.

Keywords: overhead bridge crane, main beam, cross section, FEM, FEA.

Вступ і обґрунтування актуальності. В статті [1] описані теоретичні засади створення автоматизованої системи розрахунку перетину головної балки мостового крану. Метою проведення чисельного експерименту є перевірка за критерієм міцності балки синтезованої на основі залежностей, отриманих статистичними методами.

Огляд досліджень

Автори роботи [2] зазначають, що проектування зазвичай відбувається або на основі традиційних формул з емпіричними параметрами і застосуванням досвіду проектувальників або за допомогою більш складного і витратнішого підходу, що включає розрахунок методом кінцевих елементів. Другий підхід застосовується для досягнення більшої надійності через більшу точність. Метою цього дослідження є розробка методу розрахунку, що поєднує ці підходи для досягнення високої надійності, але робить його швидшим. Для цього застосовано метод крігінга, який дозволяє визначити параметри крану на основі інтерполяції. Вихідними параметрами є маси основних елементів крану, швидкості механізмів. В результаті розрахунку визначаються розміри елементів перерізу головної і кінцевої балок. Функції обмежень враховують міцність через еквівалентні напруження та жорсткість балок через прогин і власну частоту коливань в горизонтальній і вертикальній площинах. При оптимізації ваги до уваги можуть братись обмеження на локальну та загальну стійкість балок. Подібна оптимізація виконана в роботі [3] для однобалкового крану за допомогою біологічно інспірованих метаевристичних алгоритмів.

В статті [4] розглядається прогин головної балки мостового крану, при якому візок опиняється на схилі, що призводить до необхідності долати додатковий опір при переміщенні. Пропонується оптимізація параметрів кранової металокопструкції з урахуванням впливу зварних з'єднань для мінімізації прогину. Метою такої оптимізації є економія енергії, яку доводиться витратити на подолання опору руху візка по схилу.

Розрахунок параметрів головних балок може приймати до уваги імовірнісне розподілення вантажу, що піднімається краном за термін служби [5]. Функція розподілення значень ваги вантажу отримується з міжнародних стандартів, які регламентують режими роботи кранів. Така функція замість фіксованих номінальних навантажень, які використовуються традиційно, застосована для розрахунку оптимального перетину.

Значна вага кранів може призводити до надмірного споживання енергії, на що звертається увага в роботі [6]. Вирішення даної проблеми запропоновано шляхом оптимізації перетину головної балки з обмеженнями на статичну міцність, розрахованою за значеннями власної ваги металокопструкції та ваги візка з вантажем. Виконання оптимізації виконується за допомогою алгоритмом багатодзеркального відображення (M-SRA), який поєднує алгоритм дзеркального відбиття (SRA) із традиційною оптимізацією ройового інтелекту. Недоліком дослідження є нехтування динамічними навантаженнями. Оптимізація перетину головної балки з метою зменшення ваги і покращення енергоефективності розглядається в роботі [7]. Як і в попередньому дослідженні тут використовуються спрощені залежності для визначення напружень, однак береться до уваги жорсткість копструкції.

Автори роботи [8] досліджують закономірності параметрів металокопструкції мостового крану з метою автоматизації проектування і зменшення ручної праці. Пропонується програмне забезпечення, що поєднує загальне моделювання мосту, побудову 3d моделі, аналіз методом кінцевих елементів та інші функції на одній платформі для зменшення кількості повторюваних операцій та підвищення ефективності порівняно з ручним проектуванням. Синтезована модель металокопструкції крану перевіряється на відповідність вимогам до максимальних напружень і деформацій в балках.

Комплексний вплив багатьох факторів, включаючи геометричні характеристики, стан навантаження, експлуатаційні характеристики та механізм відмови, впливає на безпеку копструкції мостового крану, що можна оцінити на стадії проектування розрахунком на витривалість. В роботі [9] авторами запропоновано розрахунок втомної довговічності копструкції мосту в режимі реального часу на основі цифрового двійника крану. Система збору інформації використовується для отримання інформації про навантаження і режими роботи. На цій основі створюється база даних. Прогнозування втомного ресурсу копструкції мостового крану в режимі реального часу реалізовано у віртуальному просторі на основі взаємозв'язку між отриманими даними та моделлю крігінга, побудованою за допомогою цих даних.

Найбільш близькими до теми дослідження можна вважати роботи [10] і [11]. В статті [10] визначається раціональний термін служби складських мостових кранів на етапах експлуатації та проектування шляхом оцінки залишкового ресурсу за критерієм питомих зведених реакцій. У результаті моделювання робочих процесів визначено величину залишкового прогину головної балки, що формується протягом одного робочого циклу з урахуванням вільних коливань та їх затухання. Проведене багатоциклове моделювання показало, що ресурс крану може бути подовжений на 20–50% завдяки оптимізації конструктивних параметрів. Це дозволяє більш точно прогнозувати залишковий ресурс і підвищити ефективність використання кранів упродовж життєвого циклу. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на експериментальну перевірку моделі та розроблення практичних методик оцінки ресурсу кранів у реальних умовах експлуатації. Метою статті [11] є обґрунтування вибору загального критерію оптимізації головних балок мостових кранів та визначення напрямів удосконалення їхніх конструктивних параметрів. У результаті дослідження визначено основні фактори руйнування балок — втома матеріалу, повзучість, корозія та старіння металу; встановлено параметри витривалості головних балок і розроблено пристрій для вимірювання

затухання їхніх коливань. Отримано експериментальні дані з різних підприємств, на основі яких визначено напрями оптимізації конструкції та розроблено запатентовану діафрагмову балку зі зменшеною масою та підвищеною жорсткістю. Це дозволяє підвищити надійність і довговічність мостових кранів, мінімізуючи локальні напруження та деформації. Однак ці роботи мають теоретичний характер і не оцінюють кількісно результати вдосконалення.

Огляд досліджень свідчить про загальний інтерес науковців до питання оптимізації перетинів балок мостових кранів, в напрямку якого зроблено суттєвий вклад. Однак не вирішеною проблемою залишається впровадження запропонованих рішень та їх кількісна оцінка. Перевірка системи автоматизованого синтезу балок мостового крану на прикладі реальної конструкції і кількісна оцінка результатів є основним завданням даної статті. З огляду на це сформульована мета дослідження.

Мета: виконати порівняльний чисельний розрахунок на міцність методом кінцевих елементів згідно існуючих нормативів базової моделі мостового крану і та моделі крану з такими ж параметрами, в якому перетин головної балки розраховано на базі статистичних залежностей.

Результати досліджень. В якості досліджуваного крану обрано мостовий двобалковий кран, вантажопідйомністю головного підйому – 50 т., допоміжного – 16т, що серійно випускався Харківським заводом підйомно-транспортного устаткування загальний вигляд якого показано на рис. 1.

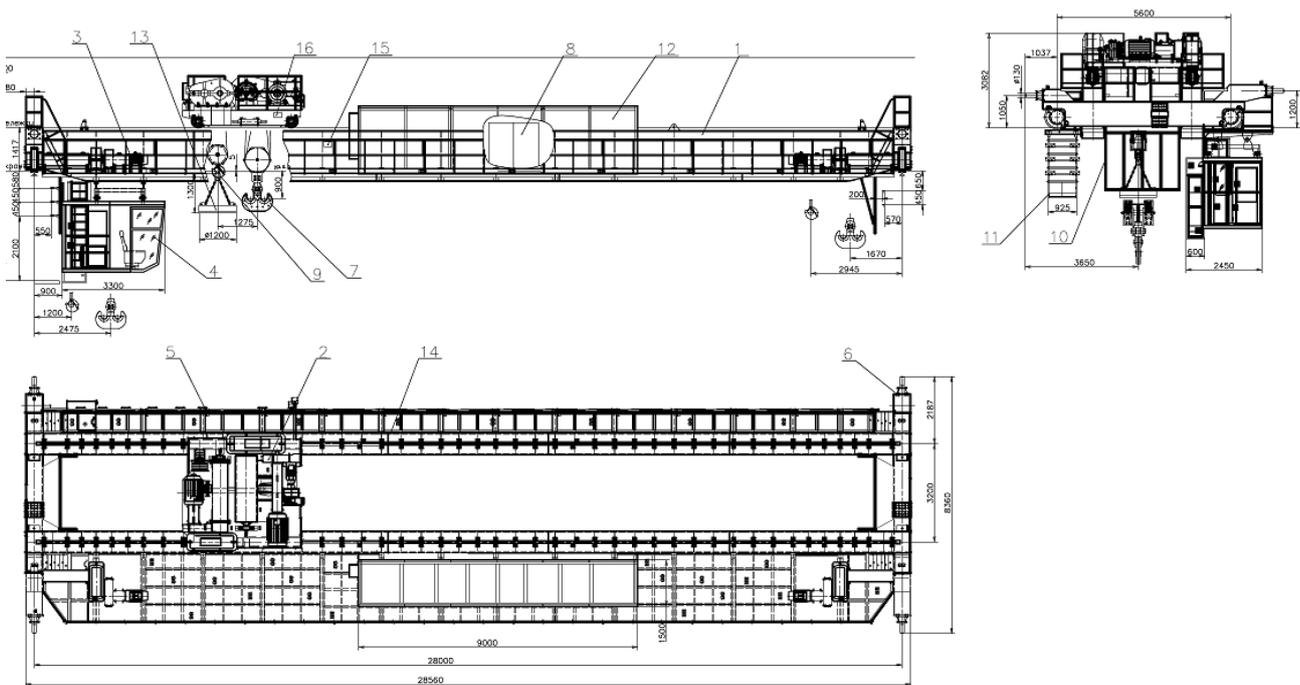


Рис. 1 - Загальний вигляд досліджуваного крану

Для проведення порівняльного дослідження розглянуто металоконструкції реального крану та побудованого за розрахованими параметрами. В обох випадках створено 3d модель металоконструкції та проаналізовано спроможність опору навантаженням за умов міцності та витривалості, а також пошук і аналіз небезпечних місць.

Моделювання металоконструкції реального крану

Модель моста реального крану було створено на основі робочих креслень. Побудова 3d-моделі крану виконувалась з адаптацією до подальшого розрахунку методом кінцевих елементів. Тому необхідно було задати відповідний рівень деталізації, який враховує лише загальні структурні елементи, що мають вплив на несучу здатність конструкції. На рис. 2 показано переріз головної балки реального крану.

На основі креслень головної балки та креслення загального виду крана було змодельовано головну балку рис. 3. Висота стінки головної балки – 1600 мм, товщина – 10 мм. Ширина верхнього поясу – 710 мм, товщина – 20 мм, ті ж самі характеристики має і нижній пояс.

На рис. 3 видно, що в моделі головної балки враховані такі елементи як діафрагми, що розташовані за правилом – крок між великими діафрагмами має дорівнювати приблизно двом висотам стінки головної балки і зменшуватись ближче до опори. В даному випадку крок між діафрагмами складає 1800 мм при висоті стінки у 1600мм. Малі діафрагми розташовані із однаковим кроком, по дві між великими діафрагмами, і саме із таким кроком розміщені кріплення підвізкових рейок.

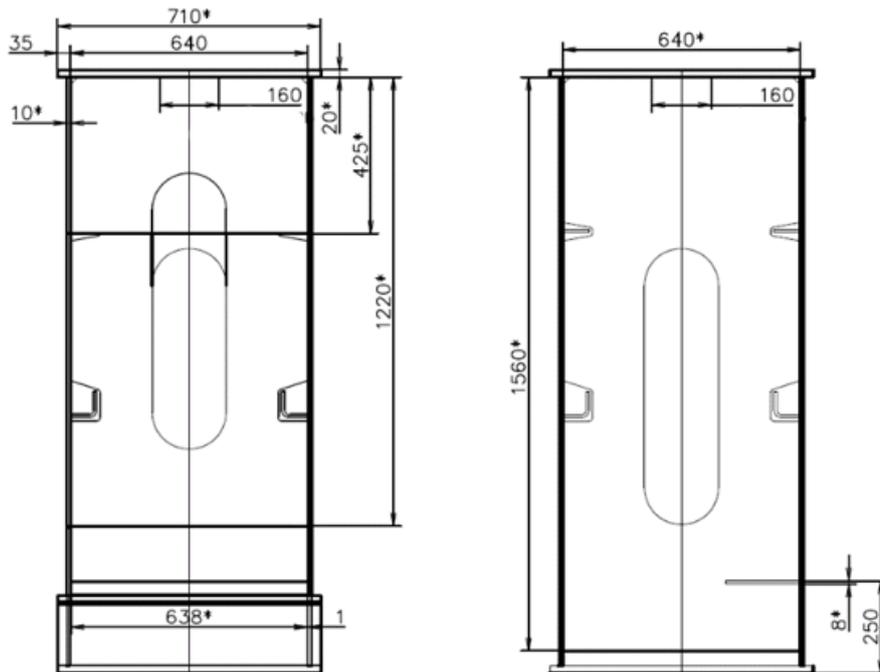


Рис. 2 - Переріз головної балки діючого крана

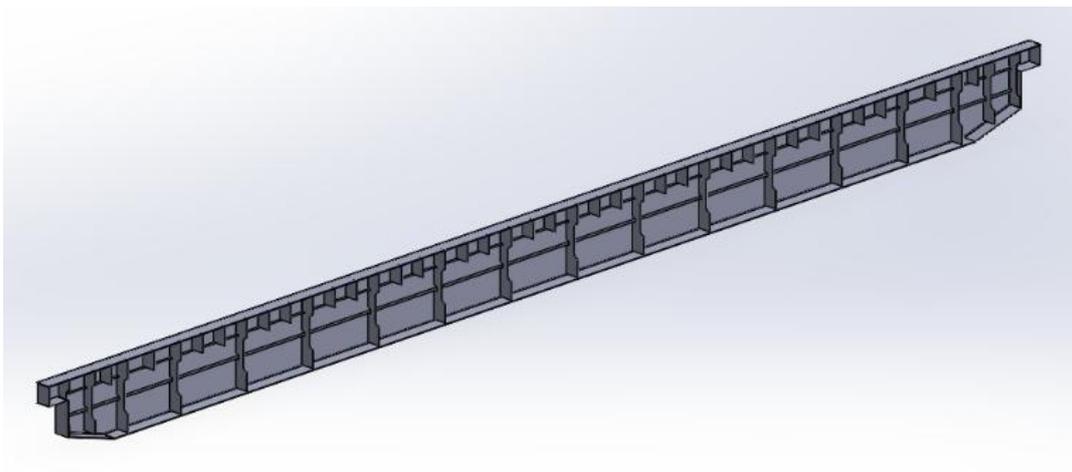
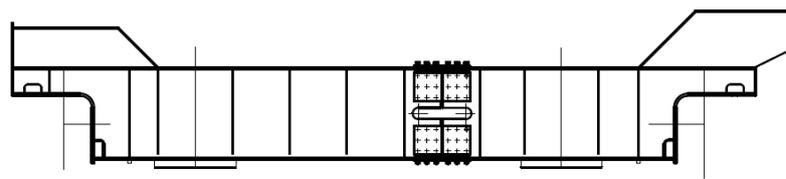
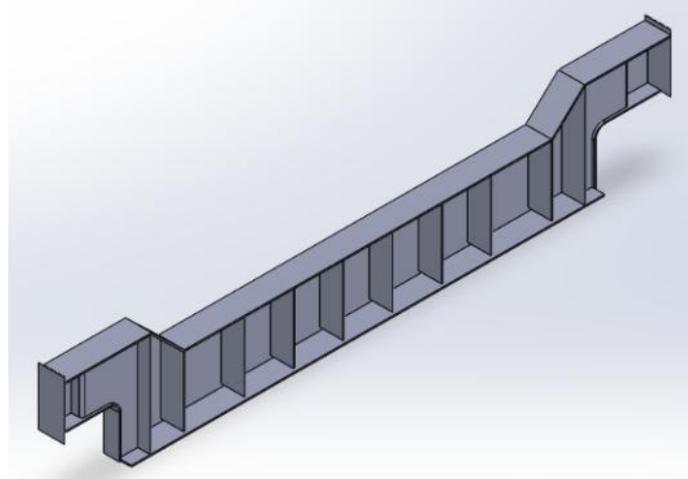


Рис. 3. - Загальний вигляд моделі головної балки з поздовжнім розрізом

Кінцева балка моделювалася також згідно креслення. Основною особливістю даної кінцевої балки є використання кутової букси та ходового колеса діаметром 710 мм. На рис. 4 представлено фрагмент робочого креслення за яким виконувалось моделювання кінцевої балки і відповідна модель. Кінцева балка також змодельована з урахуванням наявності діафрагм.



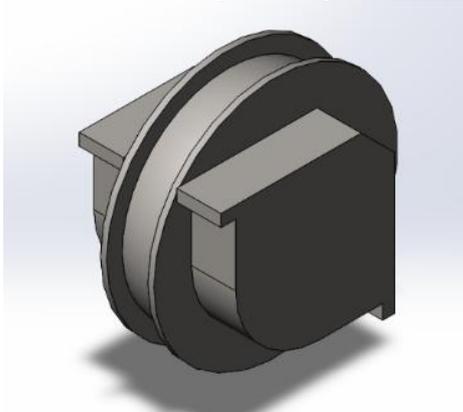
а



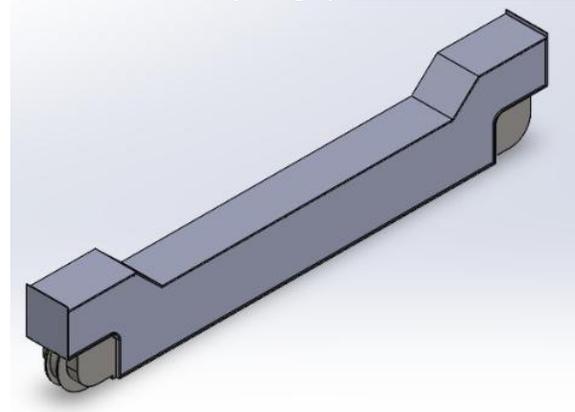
б

Рис. 4 - Креслення і відповідна модель кінцевої балки
а – фрагмент креслення загального вигляду; б – модель кінцевої балки

Буксовий вузол і ходове колесо необхідно змоделювати для можливості завдання вірного закріплення крану в розрахунку і відтворення найбільш наближених до реальності ступенів вільності конструкції. Модель буксового вузла показана на рис 5. Дана модель повторює габаритні розміри кутової букси та колеса реального крану, але має спрощену будову без деталізації. Після створення буксового вузла, його модель додано у збірку кінцевої балки.



а



б

Рис. 5 - Моделювання ходової частини крану
а – модель буксового вузла з колесом; б – встановлення моделі буксового вузла в збірку кінцевої балки

Моделі головних і кінцевих балок складено в загальну збірку моста крану. На цьому етапі виконано моделювання фланців і рейки підвізкової рейки. На рис 6 представлено сполучення головної і кінцевої балок. Стикування виконується таким чином, щоб стінки головної балки співпадали з діафрагмами кінцевої. Такий підхід відповідає реальній конструкції і зменшує локальні навантаження в подальших розрахунках методом кінцевих елементів.

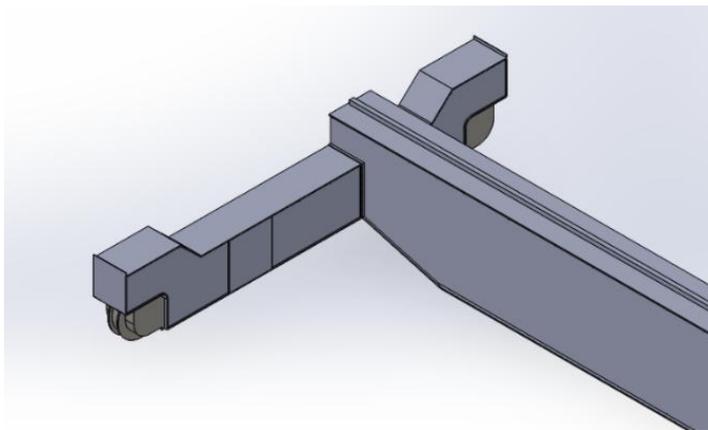


Рис. 6 - Додавання головних і кінцевих балок в загальну збірку

На рис. 7 зображено підвізкову рейку, що встановлюється на головних балках.

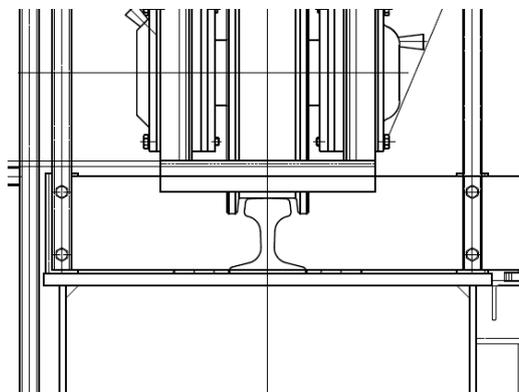


Рис. 7 - Підвізкова рейка

В реальному крані використовується рейка КР70, що вільно встановлюється на верхній пояс та закріплюється спеціальними притискними елементами. Таким чином, в розрахунках приймається, що рейка не приймає участі опорі згинанню. Однак враховувати її обов'язково потрібно, щоб точніше відтворити тиск колеса візка на балку. Для спрощення моделі підвізкова рейка замінена квадратом з перерізом 70x70 та приймає участь в розрахунку разом з верхнім поясом. Головні балки розташовуються в загальній збірці таким чином, щоб колія візка складала 3200 мм, що відповідає реальній конструкції. На рис. 8 показана готова до чисельного розрахунку модель металокопструкції реального крана.

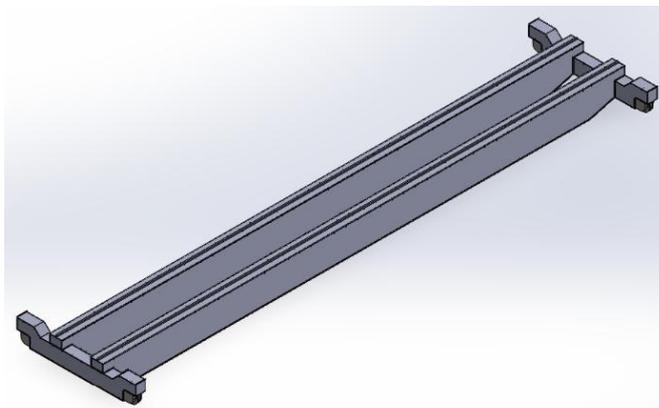


Рис. 8 - Модель металокопструкції реального крана

Чисельний розрахунок металоконструкції реального крана

Розрахунок моста крана на міцність полягає у визначенні напружень у під дією сил, прикладених до підвіскової рейки. Статичний аналіз конструкцій – визначення напружено-деформованого стану конструкцій в умовах дії статичних навантажень за заданих граничних умов.

Виконання розрахунку проведено на основі норм EN 13001.

Для перевірки міцності розглядається розрахунковий випадок з комбінацією найбільш можливих навантажень, що можуть виникати хоча б раз термін служби. Тут враховані навантаження від динаміки, а також коефіцієнти перевантаження, що враховують можливі похибки у визначенні реальних силових впливів. Розрахункове положення – візок встановлюється в середині прольоту, відбувається піднімання вантажу.

Розрахунок на витривалість виконується за нормальними навантаженнями, які діють на кран впродовж терміну служби. Розрахункова комбінація – кран нерухомий, відбувається піднімання вантажу з основи або гальмування при опусканні максимального вантажу; вантажний візок знаходиться в середній частині прольоту.

Для виконання розрахунку складено схему, яка відображає діючі навантаження та місця їх прикладання (рис. 9).

Для досягнення найбільших навантажень згідно розрахункової схеми візок зміщено на 0,25 бази від центру моста в сторону найбільш навантаженої кінцевої балки. В процесі моделювання підвіскової рейки на верхній грані зроблено ескізи прямокутної форми (рис. 10), які служать в моделі місцем прикладання зосередженого навантаження.

Таким чином сам візок в моделі не відтворюється, а замінюється силами, що імітують його вплив на міст крану. Навантаження від ваги візка складає 177 кН, а від ваги вантажу з урахуванням коефіцієнтів перевантаження і динаміки 650 кН.

Кран, що розглядається в цій роботі має схему підймання 50,0/16,0. Тобто, має механізми підймання в/п 50т та 16т, які працюють окремо. За правилами проектування, прийнято розраховувати найбільш несприятливі умови, тому подальші розрахунки будуть проводитись за умови підймання вантажу, вагою 50т, піднімання вантажу вагою 16 т не розглядається.

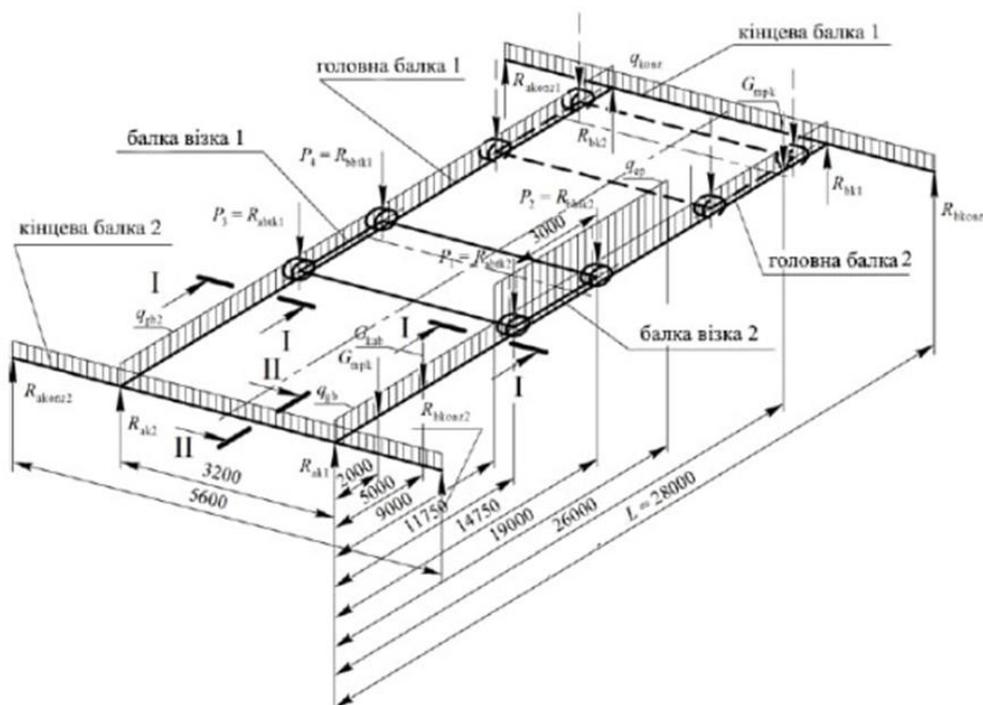


Рис. 9 - Розрахункова схема крану

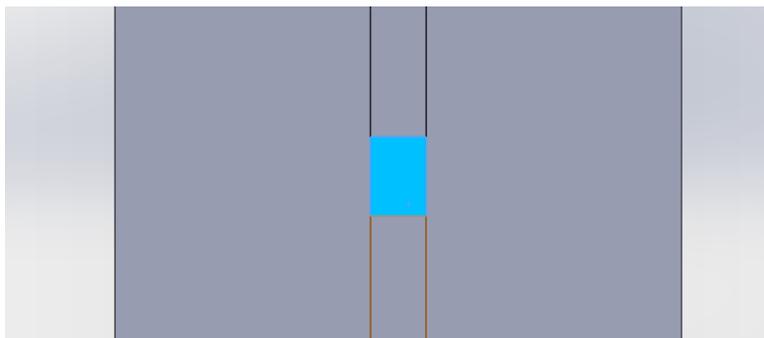


Рис. 10 - Ескізи на верхній грані рейки для прикладання зосередженого навантаження

Сила P , що діє колесо візка розраховується за формулою:

$$P = \frac{(Q_{\text{ГП}} + P_B)}{4} \quad (1)$$

де: $Q_{\text{ГП}}$ – вага вантажу головного піднімання; P_B – вага візка,

Припускається, що навантаження від ваги візка і вантажу головного піднімання розподілені рівномірно на 4 колеса.

Закріплення крану обирається таким чином, щоб забезпечити можливість кутових переміщень без лінійних зсувів в усіх трьох площинах. Закріплення здійснюється на циліндричній поверхні колеса, як показано на рис. 11.

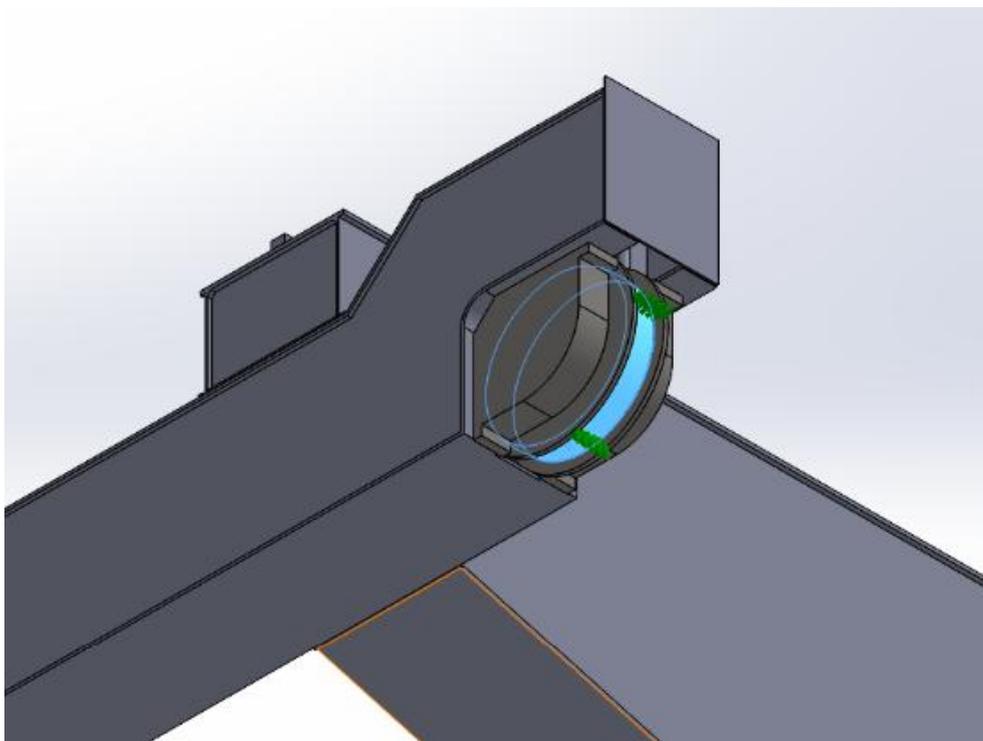


Рис. 11 - Закріплення моделі крану

Спосіб взаємодії елементів збірці крану налаштовується як пов'язаний, що відповідає умовам зварної конструкції. На рис. 12 показана модель крану із закріпленнями та силами, що прикладаються для кінцево-елементного розрахунку.

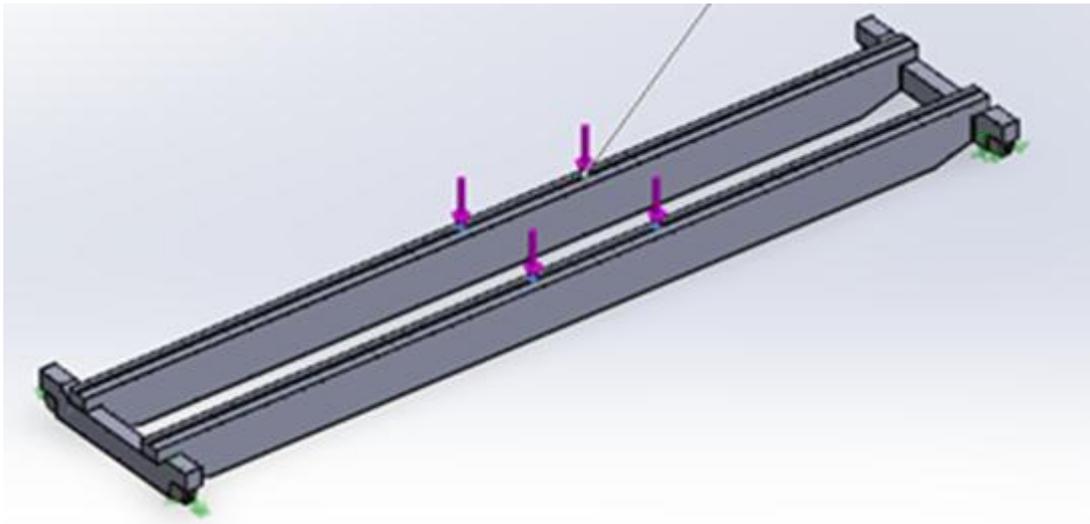


Рис. 12 - Зображення навантаження на міст

Додаємо навантаження, що розраховали раніше. Їх розташовуємо у відповідних місцях.

Одним із перших кроків у обчисленні кінцевих елементів полягає в дискретизації проблемної області на об'єднання елементів. Об'єднання цих елементів є так званою кінцево-елементною сіткою. Процес створення сітки кінцевих елементів часто називають генерацією сітки.

Це ручний процес виснажливий і іноді важкий, особливо у випадку тривимірного комплексу геометрії. Такі процедури створення сітки ще більше ускладнюються вимогою різного розподілу розміру сітки, оскільки розміри елементів контролюються підрозділом простих субрегіонів. Таким чином, потрібно більше субрегіонів для створення сітки, яка може враховувати зміни в бажаних розмірах елементів від регіону до регіону. Тому, для полегшення процедури створення сітки рівнем деталізації деталей і компонентів нехтують, або розраховують окремо, як в даному випадку (рис. 13).

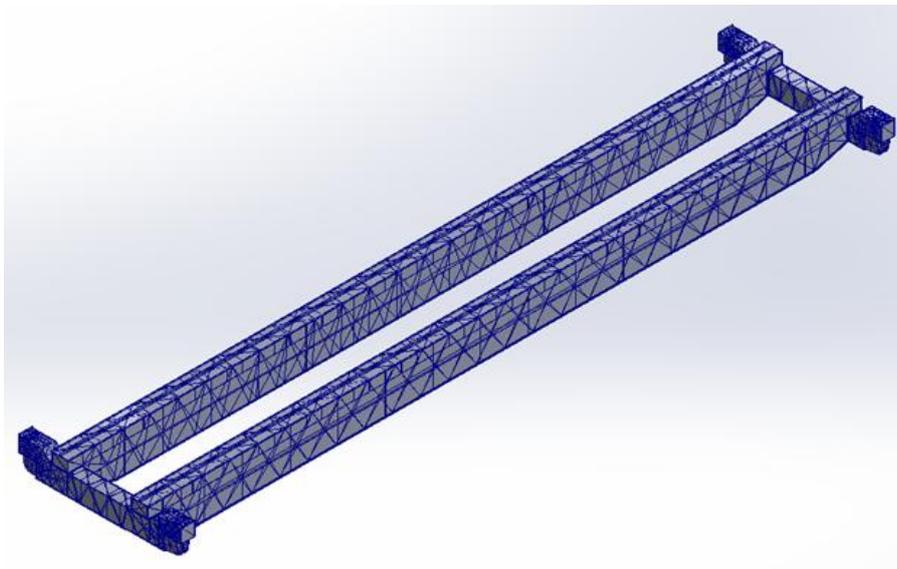


Рис. 13 - Сітка 3d моделі мотового крану

Автоматизований синтез перетину головних балок

Програма автоматичного розрахунку перерізу головних балок для крану із заданими параметрами дає наступні результати (які округлюються до стандартних значень – для товщин елементів металопрокату, або для конструктивно зручних – для ширини та висоти балки):

Товщина верхнього поясу = 0.01484080 м приймаємо 16 мм;

Ширина верхнього поясу = 0.64638697 м приймаємо 650 мм;

Товщина нижнього поясу = 0.00995006 м приймаємо 10 мм;

Ширина нижнього поясу = 0.64638697 м приймаємо 650 мм;

Товщина стінки = 0.00753963 м приймаємо 8 мм;

Висота стінки = 1.49321841 м приймаємо 1500 мм;

Перелічені розміри перенесені в модель крана, що тягне за собою зміну розмірів діафрагм, а саме – ширина і висота. Ширину діафрагми прийнято відповідно до відстані між стінками 580 мм, висоту було зменшено пропорційно.

Схема синтезованого перетину представлена на рис. 14, а розріз моделі балки із синтезованим перетином на рис. 15.

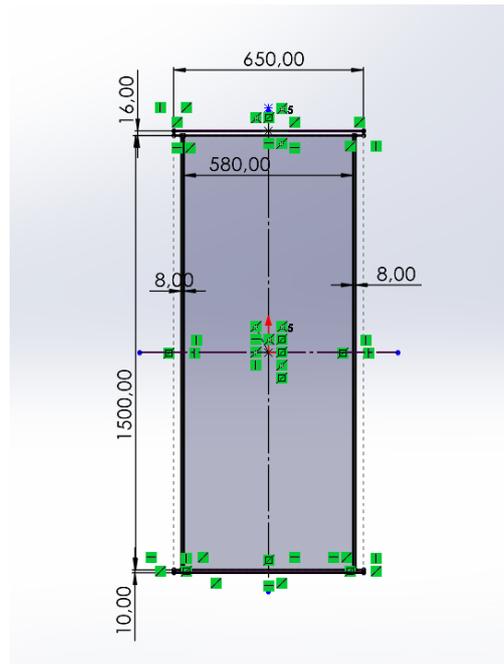


Рис. 14 - Автоматично синтезований переріз головної балки

При зміні перерізу головної балки має зменшитись вага головної балки. Завдяки цьому має зменшитись тиск на кінцеву балку, яка досить навантажена. В програмі 3d моделювання було розраховано вагу головної балки із базовим перетином та синтезованим. Встановлено, що головна балка з синтезованим перетином важить на 4315 кілограмів менше ніж базова.

Вага головної балки з базовим перетином – 15530 кг;

Вага головної балки з синтезованим перетином – 11215 кг;

З оновленою головною балкою складено міст крана. В конструкцію кінцевих балок та інших вузлів зміни не вносились.

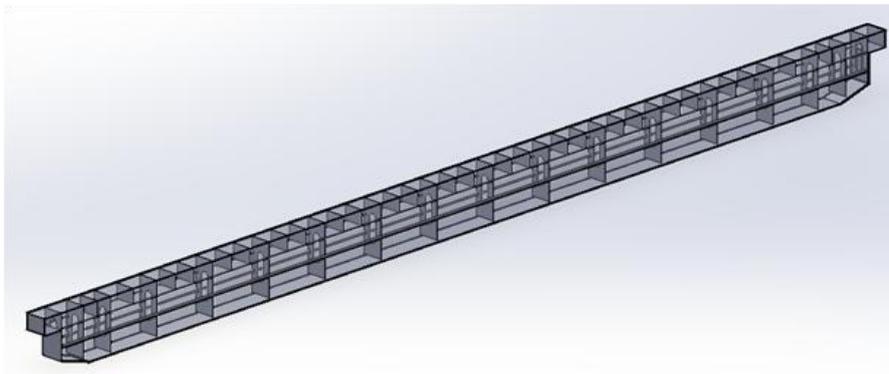


Рис. 15 - Головна балка з синтезованим перетином.

Результати моделювання напружено-деформованого стану та перевірка міцності. Базова конструкція. Візок в середині прольоту.

Розрахунок напружено-деформованого стану моста крану базової конструкції представлено на рис. 16. На рисунку 16 можна побачити, що навантаження зосереджені по центру моста. Найбільше напруженим місцем виявився нижній пояс – він зазнає деформації розтягу. При тому чітко видно нейтральну лінію.

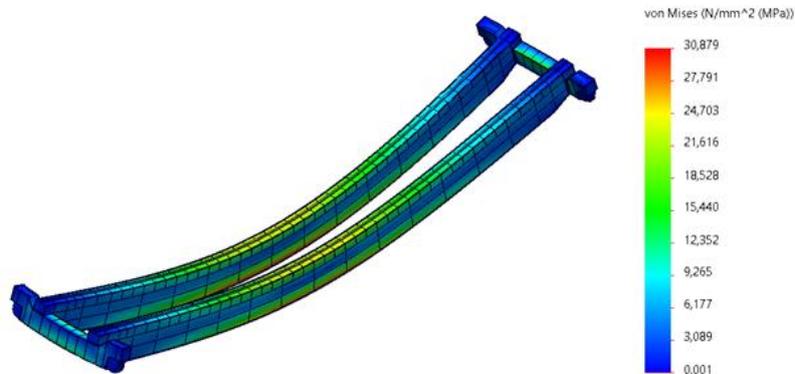


Рис. 16 - Розподіл напружень в металоконструкції моделі моста крану базової конструкції при статичному навантаженні.

Не менш важливим елементом є кінцева балка, вона теж деформується під впливом навантаження, що видно з рисунку 17.

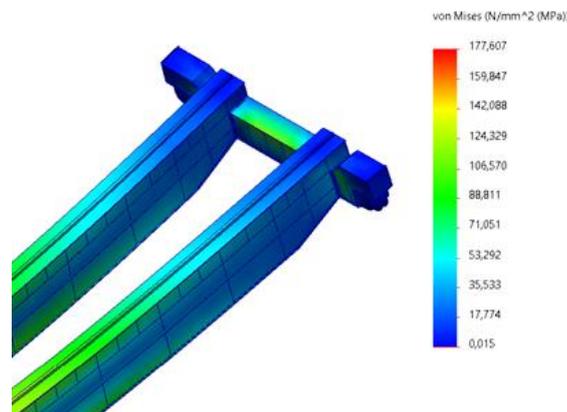


Рис. 17 - Вигляд кінцевої балки після статичного аналізу 1.

Також програмно визначено прогин моста базової конструкції в напруженому стані (рис.18). Прогин моста складає 7,4 мм. В налаштуваннях епюри було встановлено напрямок вимірювання, паралельний вертикальній осі Y.

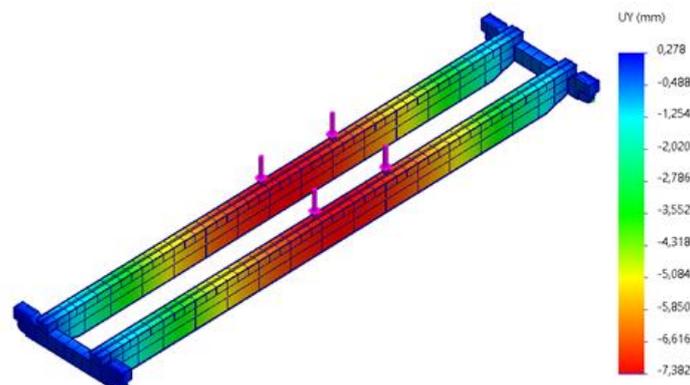


Рис. 18 - Епюра прогину моста базової конструкції

Згідно стандартів проектування кранів прогин більший за 1/1000 від довжини прольоту є критичним.

$$f = \frac{28000}{7,4} = 3783$$

де: 28000 – проліт моста, мм; 7,4 – прогин крана, мм;

Таким чином, стандарти проектування щодо жорсткості конструкції дотримані.

Базова конструкція. Візок біля опори

Розрахунковий випадок – кран нерухомий; відбувається підйом з основи або гальмування при опусканні максимального вантажу; вантажний візок у крайньому положенні біля кінцевої балки. Навантаження від сили P , модель моста крана та властивості матеріалів із яких він виготовлений прийнято такі самі, як і в попередньому розділі.

$$P = \frac{18+50}{4} \cdot 1,2 = 20,4 \text{ т}$$

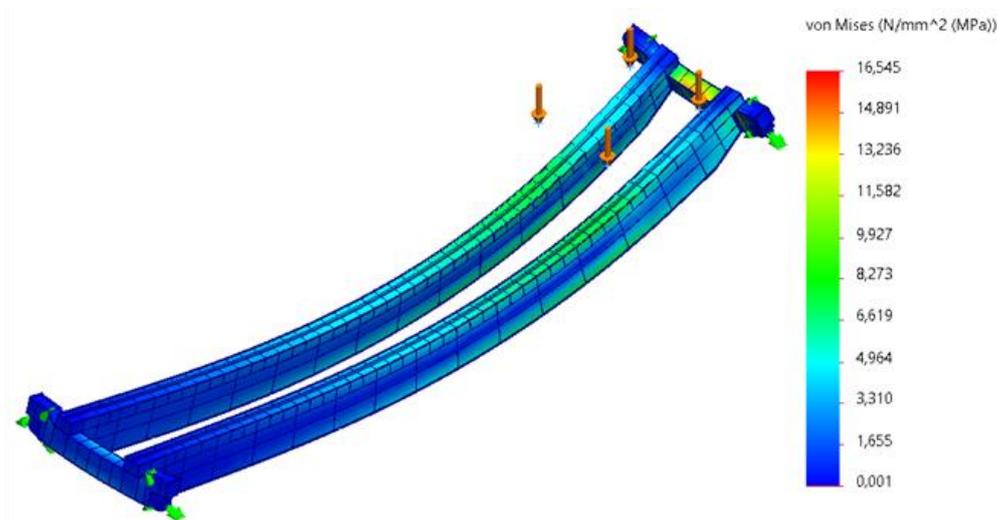


Рис. 19 - Епюра напружень моста базової конструкції у випадку розміщення візка біля опори.

З рисунку 19 можна побачити, що на кінцевій балці зосереджені значні навантаження (рис. 19) і найбільш напруженим місцем виявляється верхній пояс, який зазнає деформації розтягу.

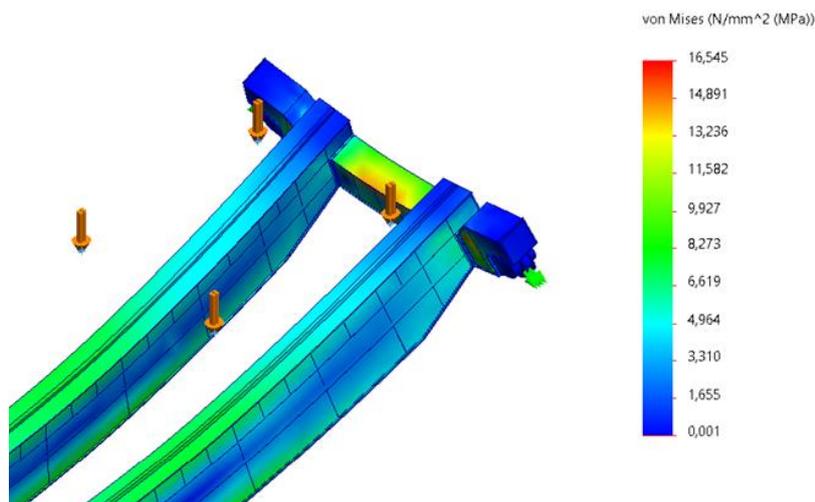


Рисунок 20 - Вигляд кінцевої балки у випадку розміщення візка біля опори.

Синтезована конструкція. Візок в середині прольоту.

Розглядається розрахунковий випадок – нормальні навантаження робочого стану, що виникають у звичайних умовах експлуатації. По них здійснюється розрахунок на витривалість за формулами другого граничного стану і розрахункова комбінація II а - кран нерухомий; відбувається підйом з основи або гальмування при опусканні максимального вантажу; вантажний візок знаходиться в середній частині прольоту. Головна балка має оновлений перетин - 650x10x1500x8x650x10x1500x8.

Розрахункова схема та навантаження такі ж самі, як в розрахунку базової конструкції.

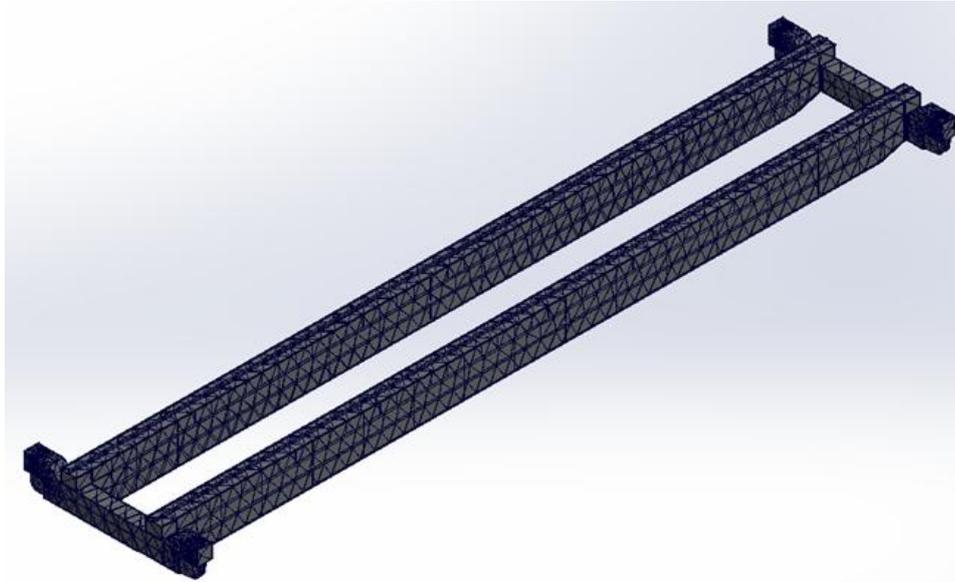


Рис. 21 - Сітка кінцевих елементів моста крану з автоматично синтезованим перерізом головних балок

Результат розрахунку напружено-деформованого стану приведено на рис. 22, а прогин моста на рис. 23.

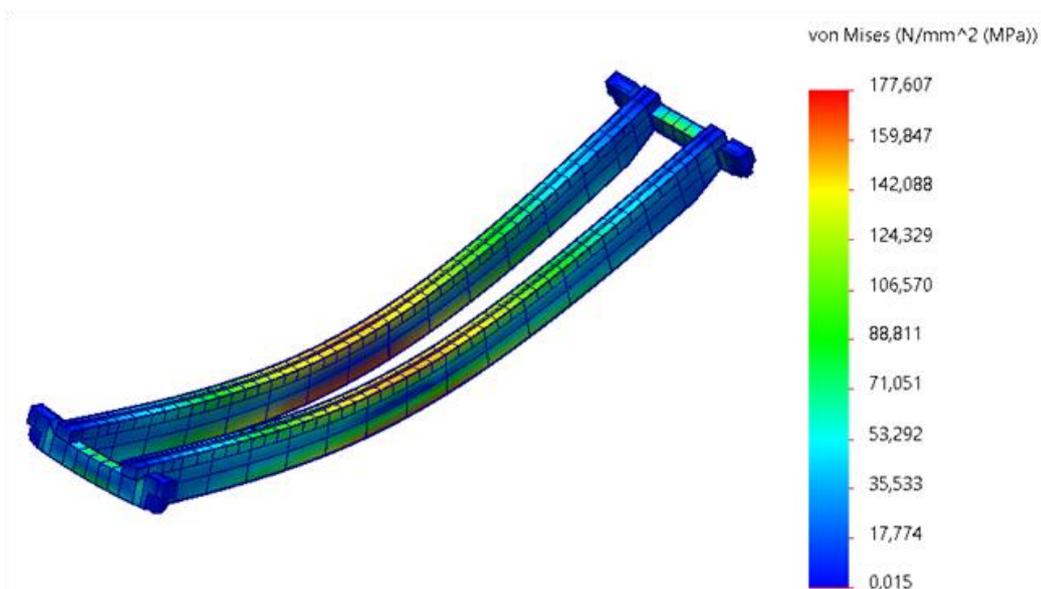


Рис. 22. - Епюра напружень моста при розміщенні візка в середині прольоту

В налаштуваннях епюри рис. 23 було виставлено паралельний напрямок вертикальній осі Y. Шкала свідчить, що максимальне переміщення складає 12 мм. Розрахуємо відносний прогин:

$$f = \frac{28000}{12} = 2333$$

Оскільки прогин є задовільним, можна зробити висновок, що стандарти дотримані.

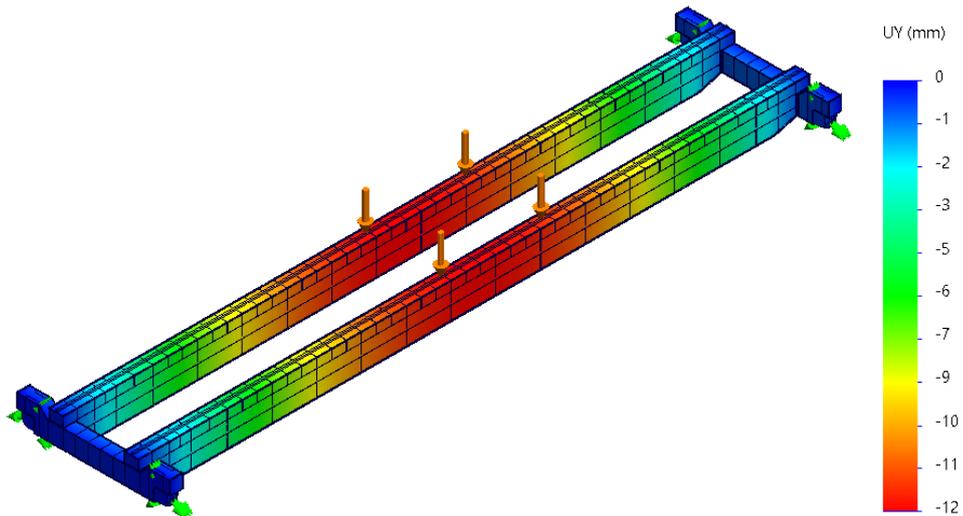


Рис. 23 - Епюра прогину моста крана

Синтезована конструкція. Візок біля опори.

Результат розрахунку приведений на рис. 24 і рис. 25. Як і в базовій конструкції найбільше навантаження зосереджене на кінцевій балці і найбільш напруженим місцем виявився верхній пояс та стінка – вони також зазнають деформації розтягу та згинання.

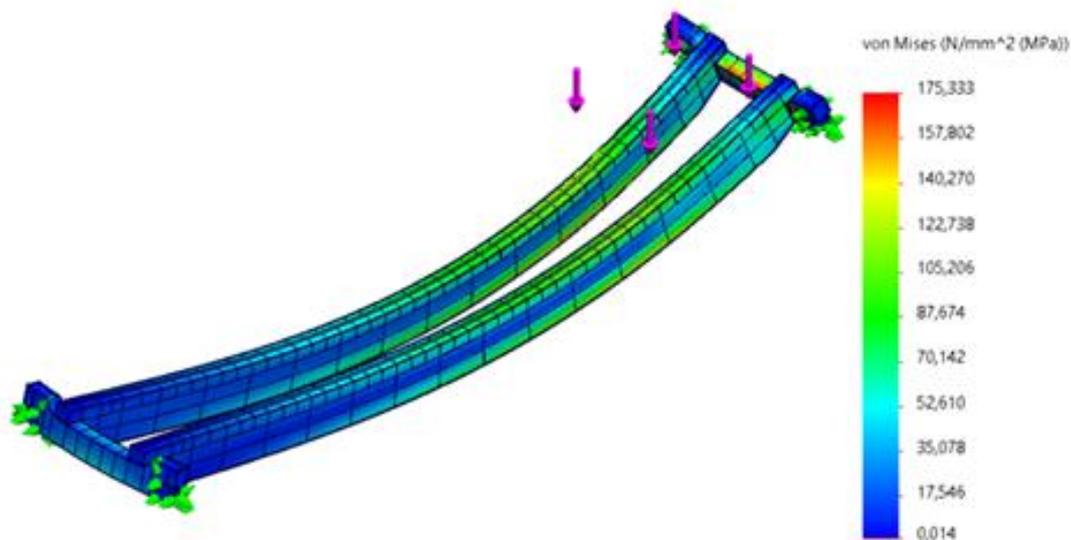


Рис. 24 - Епюра напружень моста при розміщенні візка біля опори

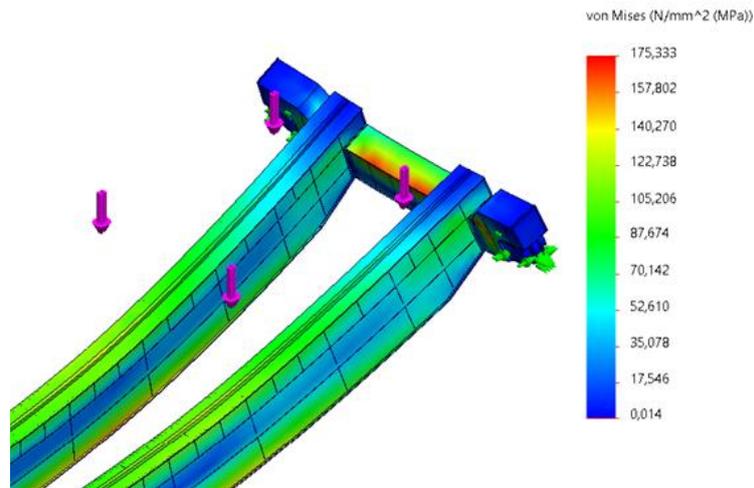
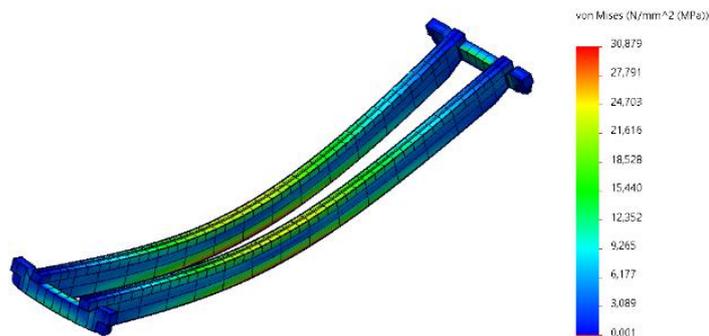


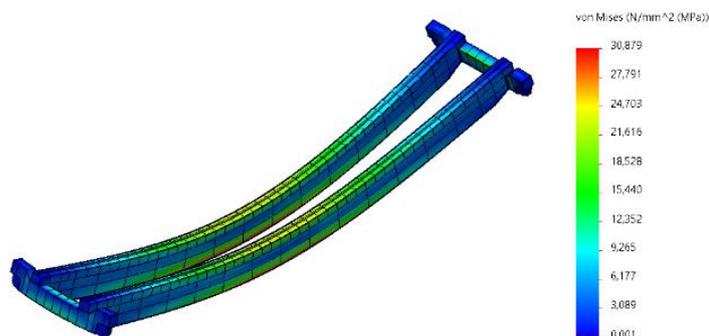
Рис. 25 - Епюра напружень моста при розміщенні візка біля опори (детальний вигляд)

Порівняння результатів розрахунку мостів крана

Візок в середині прольоту. На рисунку 26 зліва зображено міст крана із перетином головної балки 1600x10x710x20x1600x10x710x20, праворуч – 1500x8x650x16x1500x8x650x10 мм. Як випливає з рисунку, при більшому перерізі менше навантаження, але воно зосереджено прямо центру, при меншому перерізі напруження значно збільшилися, але воно розподілене вздовж головної балки. Прогин моста крана під час підймання вантажу при базовому перерізі становить 7,4 мм, а при синтезованому 12 мм, це є дуже гарним результатом при нормі прогину 1/1000 із прольотом в 28 м.



а



б

Рис. 26 - Порівняльний аналіз напружено-деформованого стану мостів крана при розміщенні візка в середині прольоту: а – базовий переріз; б – синтезований переріз

Візок біля опори. Аналіз епюр на рисунку 27 свідчить, що в крані з базовим перерізом 1600x710 навантаження менші ніж у моста із синтезованим перерізом. Крім того у моста із синтезованим перерізом більші навантаження кінцевої балки, що можна пояснити менш жорсткими головними балками. В цілому обидва моста можна вважати такими, що витримують вимоги міцності і жорсткості.

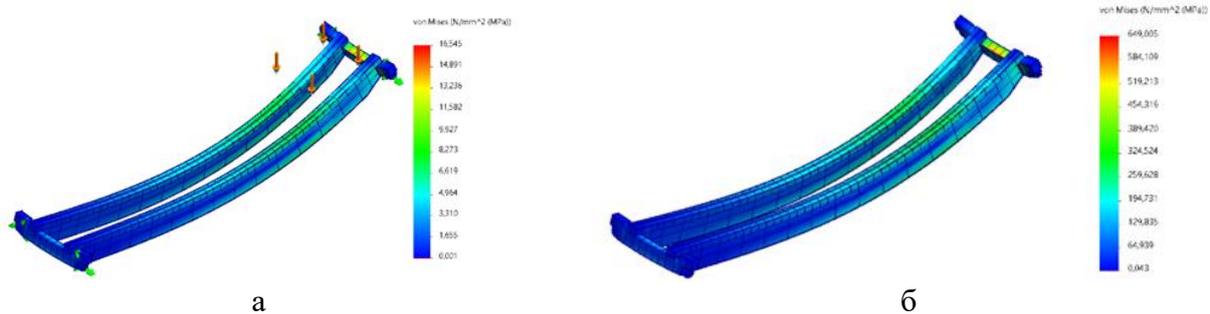


Рис. 27 - Порівняльний аналіз напружено-деформованого стану мостів крану при розміщенні візка біля опори: а – базовий переріз; б – синтезований переріз

Висновки. В результаті проведених досліджень встановлено, що синтез перерізу головної балки дозволяє зменшити вагу маста на 8,6 тон. Таке зменшення ваги сприяє зменшенню собівартості крана та прибирає зайвий матеріал, однак зменшує запас міцності внаслідок збільшення діючих напружень. Прогин моста збільшився з 7,4 до 12 мм, при цьому залишаючись в межах допустимих значень. При цьому доведено, що зменшення товщини листів поясів на 4 мм і стінок на 2 мм не порушує умов міцності та жорсткості, що свідчить про допустимість використання автоматизованого синтезу перерізів.

Список літератури:

1. Valentyn Kovalenko, Maksym Strelkov, Vsevolod Stryzhak, Volodymyr Rubashka, Halyna Anishchenko, Dmytro Ivanov, Andreea Stanciu Automated synthesis of the cross-section of the main beam of a bridge crane based on methods of mathematical statistics. International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics 2025, Issue 22, Vol. II <https://doi.org/10.17683/ijomam/issue22.v2.6>
2. Fan, X., Wang, P. & Hao, F. Reliability-based design optimization of crane bridges using Kriging-based surrogate models. Struct Multidisc Optim 59, 993–1005 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00158-018-2183-0>
3. Savković, M. M., Bulatović, R. R., Gašić, M. M., Pavlović, G. v., & Stepanović, A. Z. (2017). Optimization of the box section of the main girder of the single-girder bridge crane by applying biologically inspired algorithms. Engineering Structures, 148. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.07.004>
4. Yifei T, Lijin L, Guomin S, Dongbo L, Xiangdong L. Camber deformation estimation of bridge crane and energy-consumption analysis. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2016;230(2):313-318. doi:10.1177/0954405414548468
5. Yifei, T., Zhaohui, T., Song, M., Guomin, S., & Feng, G. (2014). Research on energy-saving design of overhead travelling crane camber based on probability load distribution. Mathematical Problems in Engineering, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/484635>
6. Qi, Q., Yu, Y., Dong, Q., Xu, G., & Xin, Y. (2021). Lightweight and green design of general bridge crane structure based on multi-specular reflection algorithm. Advances in Mechanical Engineering, 13(10). <https://doi.org/10.1177/16878140211051220>
7. Tian, G., Zhang, S., & Sun, S. (2012). The optimization design of overhead traveling crane's box girder. Advanced Materials Research, 538–541. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.538-541.2850>
8. Chang, X., & Sharma, A. (2022). Analysis and design of general bridge crane structure using CAD technology. Computer-Aided Design and Applications, 19(S2). <https://doi.org/10.14733/cadaps.2022.S2.15-25>
9. Dong, Q., He, B., Qi, Q., & Xu, G. (2021). Real-time prediction method of fatigue life of bridge crane structure based on digital twin. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 44(9). <https://doi.org/10.1111/ffe.13489>
10. Kovalenko, Valentin & Vishnevetsky, Stanislav & Brewczyński, Damian & Tora, Grzegorz. (2015). Optimal service term of the bridge cranes. Journal of KONES. Powertrain and Transport. 20. 169-176. <https://doi.org/10.5604/12314005.1137613>
11. Optimal project parameters of the bridge cranes main beams Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol,20, No.3, 2013 8 G. Vishnevetskiy, D.Brewczynski, S. Sydorenko

References (transliterated):

1. Valentyn Kovalenko, Maksym Strelkov, Vsevolod Stryzhak, Volodymyr Rubashka, Halyna Anishchenko, Dmytro Ivanov, Andreea Stanciu Automated synthesis of the cross-section of the main beam of a bridge crane based on methods of mathematical statistics. International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics 2025, Issue 22, Vol. II <https://doi.org/10.17683/ijomam/issue22.v2.6>
2. Fan, X., Wang, P. & Hao, F. Reliability-based design optimization of crane bridges using Kriging-based surrogate models. Struct Multidisc Optim 59, 993–1005 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00158-018-2183-0>
3. Savković, M. M., Bulatović, R. R., Gašić, M. M., Pavlović, G. v., & Stepanović, A. Z. (2017). Optimization of the box section of the main girder of the single-girder bridge crane by applying biologically inspired algorithms. Engineering Structures, 148. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.07.004>
4. Yifei T, Lijin L, Guomin S, Dongbo L, Xiangdong L. Camber deformation estimation of bridge crane and energy-consumption analysis. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2016;230(2):313-318. doi:10.1177/0954405414548468
5. Yifei, T., Zhaohui, T., Song, M., Guomin, S., & Feng, G. (2014). Research on energy-saving design of overhead travelling crane camber based on probability load distribution. Mathematical Problems in Engineering, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/484635>
6. Qi, Q., Yu, Y., Dong, Q., Xu, G., & Xin, Y. (2021). Lightweight and green design of general bridge crane structure based on multi- specular reflection algorithm. Advances in Mechanical Engineering, 13(10). <https://doi.org/10.1177/16878140211051220>
7. Tian, G., Zhang, S., & Sun, S. (2012). The optimization design of overhead traveling crane's box girder. Advanced Materials Research, 538–541. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.538-541.2850>
8. Chang, X., & Sharma, A. (2022). Analysis and design of general bridge crane structure using CAD technology. Computer-Aided Design and Applications, 19(S2). <https://doi.org/10.14733/cadaps.2022.S2.15-25>
9. Dong, Q., He, B., Qi, Q., & Xu, G. (2021). Real-time prediction method of fatigue life of bridge crane structure based on digital twin. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 44(9). <https://doi.org/10.1111/ffe.13489>
10. Kovalenko, Valentin & Vishnevetsky, Stanislav & Brewczyński, Damian & Tora, Grzegorz. (2015). Optimal service term of the bridge cranes. Journal of KONES. Powertrain and Transport. 20. 169-176. <https://doi.org/10.5604/12314005.1137613>.
11. Optimal project parameters of the bridge cranes main beams Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol,20, No.3, 2013 8 G. Vishnevetskiy, D.Brewczynski, S. Sydorenko

Надійшла (received) 02.12.2025 р.

Відомості про авторів / About the Authors

Коваленко Валентин Олександрович (Kovalenko Valentyn) – кандидат технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри підйомно-транспортних машин і обладнання, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9161-198X>; e-mail: valentyn.kovalenko@khpi.edu.ua

Стрелков Максим Борисович (Strelkov Maksym) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри підйомно-транспортних машин і обладнання, м. Харків, Україна; e-mail: maksym.strelkov@mit.khpi.edu.ua

Стрижак Всеволод Вікторович (Stryzhak Vsevolod) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри підйомно-транспортних машин і обладнання, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3032-6004>; e-mail: vsevolod.stryzhak@khpi.edu.ua

Рубашка Володимир Петрович (Rubashka Volodymyr) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри підйомно-транспортних машин і обладнання, м. Харків, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9856-3850>; email: Volodymyr.Rubashka@khpi.edu.ua

Турчин Ольга Володимирівна (Turchyn Olha) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри підйомно-транспортних машин і обладнання, м. Харків, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-9153-3704>; e-mail: olha.turchyn@khpi.edu.ua

Гнатенко Григорій Олександрович (Gnatenko Grygoriy) – кандидат технічних наук, доцент кафедри підйомно-транспортних машин і обладнання, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5450-375X>; e-mail: Grygoriy.Gnatenko@khpi.edu.ua