

## МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.875.5:624.014-047.58

Ю. Г. САГІРОВ<sup>1\*</sup>, В. В. СУГЛОБОВ<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Підйомно-транспортні машини і деталі машин», ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87500, тел. +38 (096) 307 93 14, ел. пошта sagirov1978@ukr.net, ORCID 0000-0002-8854-0639

<sup>2</sup>Каф. «Підйомно-транспортні машини і деталі машин», ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87500, тел. +38 (067) 623 12 69, ел. пошта suglobov\_v\_v@ukr.net, ORCID 0000-0003-1743-0894

### МОДЕЛЮВАННЯ НАВАНТАЖЕНОСТІ ТА АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ ПОРТАЛУ КРАНА

**Мета.** За основну мету цієї роботи ми ставимо моделювання навантаженості порталу під час роботи крана «Азовець», аналіз фактичного напружено-деформованого стану елементів металоконструкції порталу. Об'єктом дослідження є закономірність розподілу напружень в елементах порталу. **Методика.** Для досягнення поставленої мети використані методи: аналітичних інженерних розрахунків, імітаційного моделювання, скінченних елементів, візуально-оптичний метод під час обстеження стану металоконструкції крана. **Результати.** Із використанням CAD/CAE-системи було змодельовано навантажений стан металоконструкції порталного крана та виконано розрахунок її на міцність методом скінченних елементів. Наведено результати розрахунків та аналізу напружено-деформованого стану. Отримана закономірність розподілу напружень в елементах колони наочно показала, що напруження розподілені нерівномірно; напружено-деформований стан елементів порталу є досить складним, нерівномірним і потребує модернізації. **Наукова новизна.** Отримали подальший розвиток наявні методи проектування металоконструкцій порталних кранів. Уперше запропоновано методику проектування раціональних металоконструкцій за критеріями рівномірності розподілу напружень та плавності силового потоку, які також уперше отримали наукове обґрунтування. Уперше розроблені твердотільні моделі металоконструкції порталного крана, які дозволяють визначати закономірність розподілу напружень/навантажень і плавності силового потоку в них. **Практична значимість.** Розроблено та впроваджено просторову твердотільну комп'ютерну модель порталу крана «Азовець». Запропоновано методику міцнісного аналізу та раціонального проектування металоконструкції порталних кранів. Подано науково обґрунтовані рекомендації з ремонту й посилення елементів порталу крана «Азовець». Результати теоретичних і практичних досліджень можуть бути використані для викладання навчальних курсів «Проектування металевих конструкцій підйомно-транспортних машин», «Основи автоматизованого проектування машин», «Автоматизоване проектування ПТМ», «Ремонт, монтаж і змачення ПТМ». Наприклад, дані результати використовують у ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет».

*Ключові слова:* металоконструкція; порталний кран; моделювання; навантаженість; метод скінченних елементів; синтез; оптимізація

#### Вступ

Під час експлуатації вантажопідіймальних машин (ВПМ), у тому числі й порталних кранів, досить часто виникають дефекти несних металоконструкцій: тріщини у місцях з'єднань

елементів і кріплення ребер жорсткості біля зварних швів, тріщини в основному металі, розшарування кромки основного металу та ін. Причому вони можуть з'являтися і в досить нових (3–5 років експлуатації) машинах. Причин таких явищ, дослідити які можна завдяки детальному аналізу напружено-деформованого

## МАШИНОБУДУВАННЯ

стану, може бути багато (не завжди вдалі рішення під час проектування; умови експлуатації). У кожному окремому випадку причина одна або їх кілька. Виникає необхідність проведення ремонтів, що не завжди ефективно, оскільки дефекти виникають повторно. Підвищення експлуатаційної надійності підйомно-транспортних машин (ПТМ) шляхом уточнення наявних і розробки нових методик розрахунку їхніх металевих конструкцій є актуальним науково-технічним завданням.

На нашу думку, як заходи з ремонту, так і прийняття конструктивних рішень під час проектування (визначення геометричних параметрів) повинні ґрунтуватись на якісному аналізі напружено-деформованого стану металоконструкції та її елементів, розрахунках на міцність. На сьогодні це є можливим завдяки застосуванню методу скінченних елементів, сучасних персональних комп'ютерів і відповідних систем CAD/CAE.

Раніше в роботі [2] виконаний аналіз наявних методів проектування й оптимізації металевих конструкцій, у тому числі металевих конструкцій ВПМ. Цей метод набуває все більшого застосування. Традиційні розрахунки кранових металоконструкцій на міцність, які застосовуються у переважній більшості, засновані на припущенні плоскої схеми їх роботи, тоді як їх елементи працюють як просторові системи. Однак, на даний час поступово зникає необхідність в розбивці на плоскі елементи і взагалі в розрахунку ізольованих великих вузлів металоконструкцій.

Разом із тим відсутні методики, які б пропонували послідовність розробки моделей, прийняття розрахункових схем, вимоги до розрахунків і до отриманих результатів під час проектування металоконструкцій ПТМ із застосуванням методу скінченних елементів і використанням CAD/CAE-систем. Перспективним є напрямок використання елементів методу топологічної оптимізації під час проектування металевих конструкцій, який є досить розповсюдженим [2, 3, 5–7].

**Мета**

За основну мету цієї роботи ми ставимо моделювання навантаженості порталу під час роботи крана «Азовець» (рис. 1) та аналіз факти-

чного напружено-деформованого стану елементів його металоконструкції.

Об'єктом дослідження є закономірність розподілу напружень в елементах порталу.

*a – a*



*б – б*



Рис. 1. Кран портальний «Азовець»: *a* – загальний вигляд; *б* – портал та колона

Fig. 1. Port Azov Crane: *a* – general view; *b* – gantry and pillar

**Методика**

У роботі [3] для визначення навантаженого стану, з урахуванням рекомендацій і даних [4], була розроблена розрахункова схема (рис. 2) на підставі геометричних параметрів

## МАШИНОБУДУВАННЯ

крана і діючих навантажень. Запропонована методика розрахунку й оптимізації (підсилення) металоконструкції порталного крана з використанням сучасного інструментарію, розроблена просторова твердотільно-деформована модель порталу крана «Азовець», згенерована сітка скінченних елементів. Також у [3] була запропонована розрахункова схема й визначені навантаження, що діють на металеву конструкцію, виконаний аналіз напружено-деформованого стану металоконструкції колони. Місця прикладання сил та їх напрямки збережені для розв'язання цього завдання.

Для фактичного й подальшого аналізу напружено-деформованого стану металоконструкції порталу крана виконано уточнений розрахунок методом скінченних елементів.

Розрахункові навантаження і їх комбінації взяті відповідно до норм розрахунку металоконструкцій порталних кранів [4]. Розрахунковий випадок II з визначення міцності металевих конструкцій враховує максимальне (граничне) робоче навантаження, яке включає, окрім навантажень від власної та номінальної ваги вантажу й вантажозахоплювального пристрою, також і максимальні динамічні навантаження, що виникають під час різких пусків і екстреного гальмування механізмів, раптового ввімкнення (вимкнення) електричного струму, і граничні значення вітрового навантаження робочого стану.

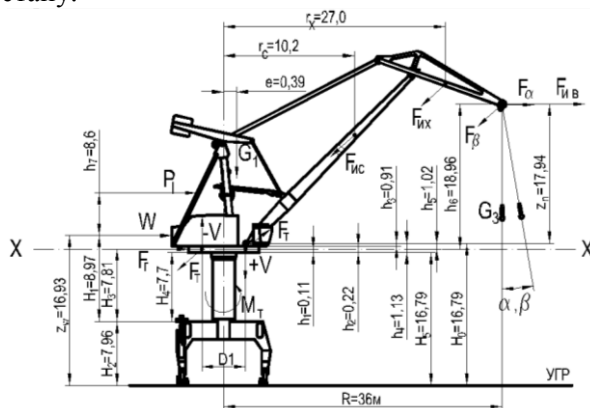


Рис. 2. Розрахункова схема [3]

Fig. 2. Calculation scheme [3]

Зусилля було розраховано за двох варіантів навантаження.

Варіант I: працює тільки механізм підйому, комбінація навантажень II а:

- 1) вага вантажу –  $G$ ;
- 2) коефіцієнт динамічності –  $\psi_{II}$ ;
- 3) кут косоного підйому –  $\alpha_{під}$ .

Варіант II: працюють механізми зміни вильоту й повороту.

Комбінація навантажень II в:

- 1) вага вантажу –  $G$ ;
- 2) кути відхилення канатів від вертикалі –  $\alpha_{п}$ ,  $\beta_{п}$  (у площині гойдання стріли й перпендикулярно до площини гойдання стріли відповідно);
- 3) сили інерції дотичні стріли і хобота під час повороту крана –  $0,5 \cdot F_{ic}$ ,  $0,5 \cdot F_{ix}$  відповідно;
- 4) сили інерції під час зміни вильоту –  $0,5 \cdot F_{iv}$ ;
- 5) сила вітру робочого стану –  $P_1$ .

## Результати

Метод скінченних елементів реалізовано в CAD/CAE-системі. Згідно з кресленням була розроблена комп'ютерна 3D-модель зі збереженням геометричних параметрів (рис. 3) [3]. Після перевірки моделі на адекватність було прийнято рішення: як опори порталу застосувати шарнірне закріплення, для чого були змодельовані відповідні елементи (рис. 4). Таке рішення дозволило імітувати процес можливого провороту ходового колеса відносно рейки в результаті деформації металоконструкції порталу, що більшою мірою відповідає поведінці реального об'єкта.

Після розробки моделі була згенерована сітка скінченних елементів. Розмір мінімального стрижня взято меншим за мінімальний геометричний розмір у моделі.

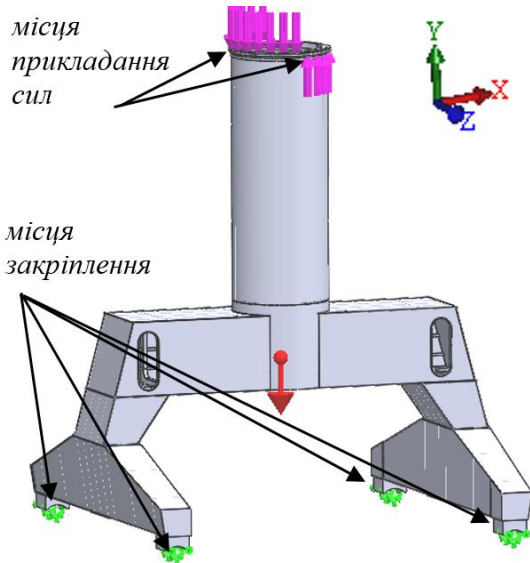
У результаті моделювання напружено-деформованого стану були отримані епюри розподілу еквівалентних напружень у моделі, епюри нормальних напружень у трьох площинах, епюра розподілу коефіцієнта запасу міцності, епюра направленості силових потоків, епюра розподілу еквівалентних напружень (von Mises) із застосуванням обмеження ISO для двох варіантів навантажень.

Попередній аналіз напружено-деформованого стану порталу за першим і другим варіантом навантаження показав, що найбільш несприятливим (більші значення напру-

## МАШИНОБУДУВАННЯ

жень) є перший варіант. Загальний вигляд епюри розподілу еквівалентних напружень наведено на рис. 5. Модель представлена у деформованому вигляді – для більшої наочності всі деформації збільшено у 30 разів. Розглянемо її більш детально.

*a – a*



*б – б*

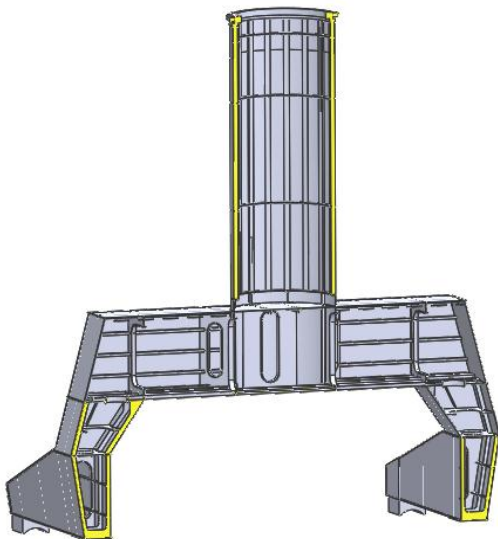


Рис. 3. Модель порталу:  
*a* – загальний вигляд; *б* – переріз

Fig. 3. Gantry model:  
*a* – general view; *b* – section

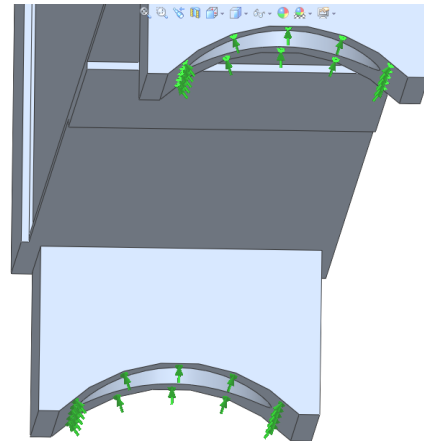


Рис. 4. Місця закріплення моделі (збільшено)

Fig. 4. Places for fixing the model (enlarged)

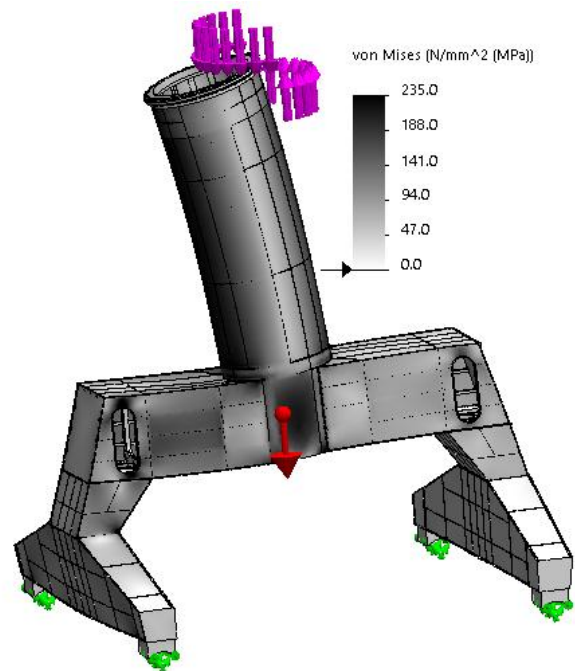


Рис. 5. Загальний вигляд епюри розподілу еквівалентних напружень на деформованій моделі (усі переміщення збільшено в 30 разів)

Fig. 5. General view of the distribution diagram of equivalent stresses on the strained model (all displacements are increased by 30 times)

На епюрі розподілу еквівалентних напружень (рис. 5) світлі ділянки відповідають меншим значенням напружень, темні – більшим значенням. Необхідно виявити місця концентрації напружень, оскільки такі ділянки можуть бути джерелом появи тріщин і руйнувань конструкції. Для більш наочного відображення мак-

## МАШИНОБУДУВАННЯ

симально напружених ділянок металоконструкції побудовано епюру із застосуванням інструменту «обмеження ISO», який дає змогу не відображати ділянки (зробити їх прозорими), напруження в яких є меншими за встановлене (граничне) значення. Граничне значення напружень узято 113 МПа. У результаті отримано епюру, яку представлено на рис. 6.

Як видно з епюри (рис. 6), можна виділити наступні елементи, які є найбільш навантаженими:

- 1 – внутрішні кути місця з'єднання опори й балки;
- 2 – зовнішній лист ригеля над і під пройомом для входу;
- 3 – верхній і боковий листи в місцях з'єднання з колоною;
- 4 – кутова діафрагма всередині ригеля;
- 5 – внутрішні кути місця з'єднання балки з балансиrom механізму пересування крана.

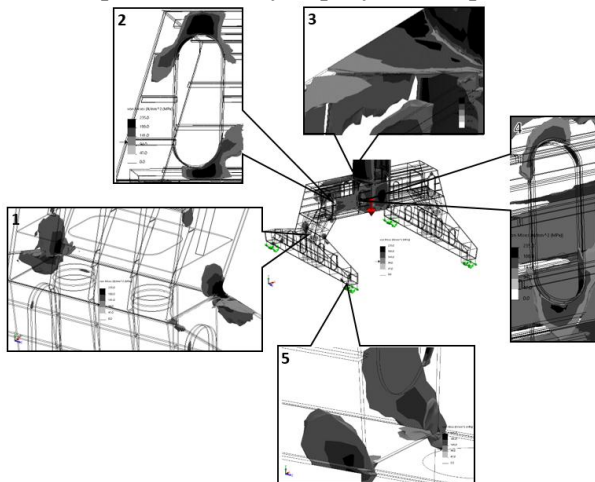


Рис. 6. Відображення найбільш навантажених елементів після застосування обмеження ISO (113 МПа)

Fig. 6. Displaying the most loaded elements after applying the ISO limit (113 MPa)

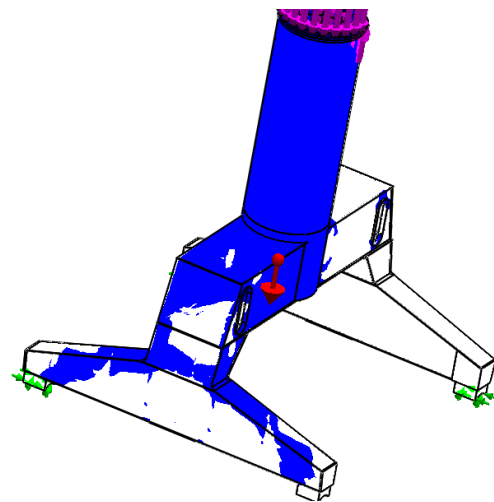
На епюрі направленості силових потоків (рівномірності розподілу напружень) (рис. 7) наочно видно елементи металоконструкції, які більш ефективно (для прийнятої розрахункової схеми) задіяні в передачі сил від місця їхнього прикладання до опорної частини крана. Ділянки, які не задіяні в передачі сил, є прозорими. Як бачимо, досить багато таких елементів

у конструкції балки й опори, що свідчить про не дуже вдалий конструктивні рішення, бо забезпечення плавності силового потоку є важливим принципом конструювання.

Детальний аналіз напружено-деформованого стану із застосуванням наявного інструментарію сучасних CAD/CAE-систем, проведемо на прикладі елемента 1 (рис. 6).

На рис. 8 представлено епюру розподілу еквівалентних напружень von Mises (МПа) у місці з'єднання опори й балки (внутрішній кут).

*a – a*



*б – б*

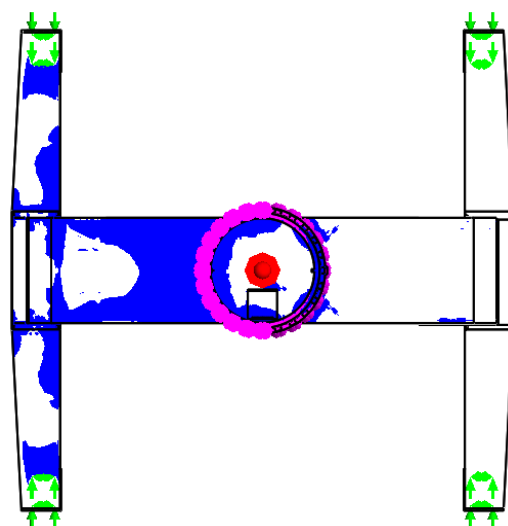


Рис. 7. Епюри направленості силових потоків:  
*a, б* – різні види на модель

Fig. 7. Episodes of direction of power flows:  
*a, b* – different views on the model

## МАШИНОБУДУВАННЯ

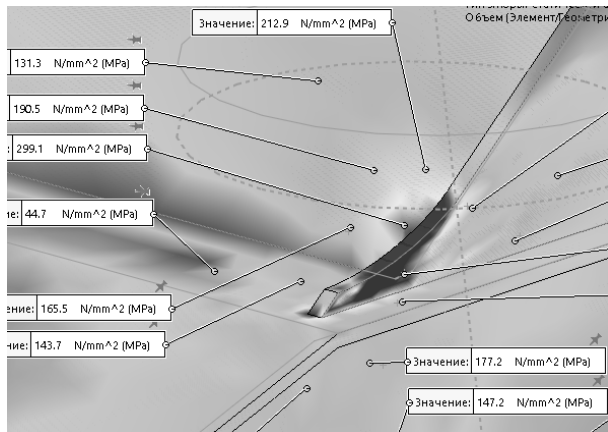


Рис. 8. Значення еквівалентних напружень (МПа) у місці з'єднання опори та балки

Fig. 8. The value of equivalent stresses (MPa) at the point of the connection of the support and beams

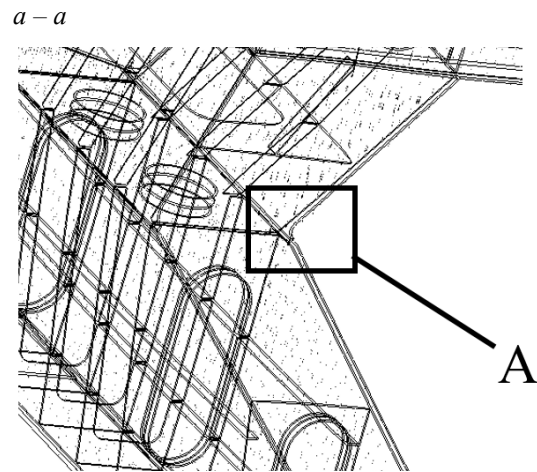
Аналіз документації з обстеження метало-конструкції крана показав, що в зазначеному елементі наявні: тріщина поруч зі зварним швом, розшарування основного металу по кро-мці (рис. 9), що цілком відповідає місцю кон-центрації еквівалентних напружень, отримано-му під час моделювання навантаженого стану.



Рис. 9. Фотографія ділянки металоконструкції з виявленими дефектами

Fig. 9. Photo of metal structure section with revealed defects

Якщо розглянути (рис. 10, *a*) векторну епюру розподілу нормальних напружень (довжина стрілок на векторному представленні епюр пропорційна величині напружень) у вертикальній площині (вісь  $Y$ , рис. 3), то можна бачити, що максимальними (214 МПа) є напруження стискування (рис. 10, *б*). Значення напружень розтягнення сягають 77 МПа.



*б – б*

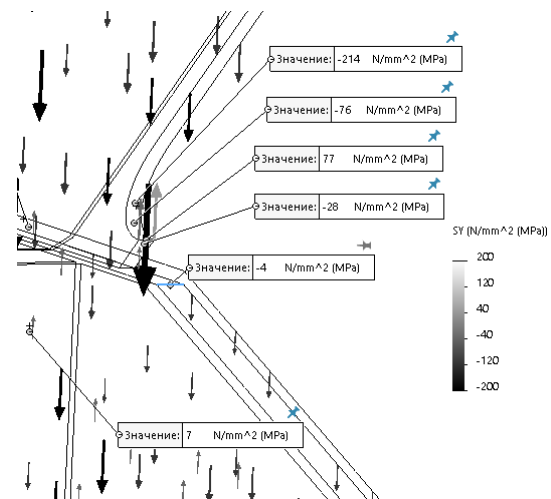


Рис. 10. Загальний вигляд:  
*a* – векторного представлення епюри розподілу нормальних напружень у вертикальній (вісь  $Y$ ) площині;  
*б* – збільшений вигляд ділянки *A* – напрям розтягнення↑, напрям стискування↓

Fig. 10. General view:  
*a* – of the vector representation of the distribution diagram of the normal stress in the vertical plane (axis  $Y$ ); *b* – the enlarged view of the section *A* – direction of stretching↑, direction of compression↓

Слід зазначити, що напружено-деформований стан змодельовано для конкретного робочого стану крана, модель є статичною. Цей факт можна віднести до недоліків використаного програмного середовища, бо для отримання напружено-деформованого стану за інших умов (наприклад, інші положення стріли крана відносно рейкової колії) необхідно розробити нову розрахункову модель і повторити розрахунок. Чим більше буде розглянуто можливих варіантів розрахункових схем, тим біль-

## МАШИНОБУДУВАННЯ

ше інформації можна отримати про напружений стан елементів металокопструкції під час експлуатації. Не можна відкидати припущення, що під час роботи крана деякі напруження змінюють напрямок на розглядуваній ділянці, що й призводить до розшарування металу на торцевій поверхні листа.

Розглянемо (рис. 11) векторну епію розподілу нормальних напружень у горизонтальній площині (вісь X, рис. 11) для цієї ж ділянки. Видно, що в цій площині також діють різноспрямовані напруження, хоча за рівнем мають дещо менші значення: стискання – 62 МПа, розтягнення – 52 МПа.

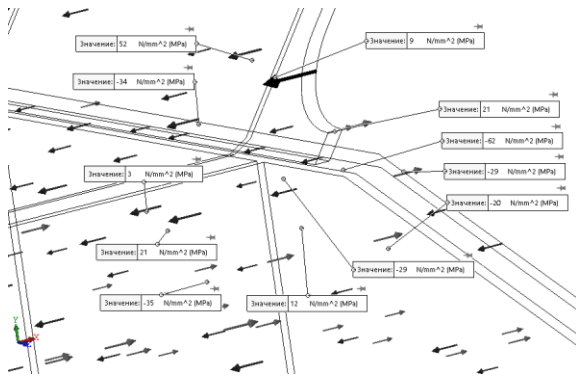


Рис. 11. Збільшений вигляд векторного представлення епію розподілу нормальних напружень у горизонтальній (вісь X) площині (ділянка А, рис. 10) – напруження стискання  $\blacktriangleleft$ , напруження розтягнення  $\blacktriangleright$

Fig. 11. Enlarged view of the vector representation of the distribution diagram of normal stresses in the horizontal plane (X-axis) (section A, Fig. 10) com-pression stresses  $\blacktriangleleft$ , tension stresses  $\blacktriangleright$

На векторній епію розподілу нормальних напружень у горизонтальній площині (вісь Z, рис. 12) для цієї ж ділянки видно, що переважно діють напруження стискання – 136 МПа.

Проведений аналіз доводить, що напружений стан розглядуваної ділянки є складним, її копструкція недосконала (що також підтверджено практикою експлуатації) та потребує модернізації. У процесі експлуатації крана не можна вносити суттєві зміни в його копструкцію, повною мірою не має змоги використати результати структурного синтезу, що дозволило б перерозподілити матеріал у копструкції, змінити форму елементів та ін.

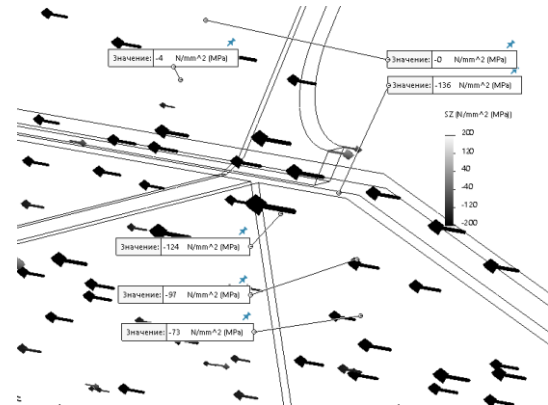


Рис. 12. Збільшений вигляд векторного представлення епію розподілу нормальних напружень у горизонтальній (вісь Z) площині (ділянка А, рис. 10) – напруження стискання  $\blacktriangleleft$ , напруження розтягнення  $\blacktriangleright$

Fig. 12. Enlarged view of the vector representation of the distribution diagram of the normal stresses in the horizontal plane (Z axis) (section A, of Fig. 10) – compression stress  $\blacktriangleleft$ , tension stress  $\blacktriangleright$

Із використанням отриманих результатів за наведеною методикою набагато легше було б внести зміни в копструкцію ще на етапі проектування. Можна було б повною мірою використати результати аналізу напружено-деформованого стану металокопструкції, параметричного й структурного синтезів із метою винайдення оптимальної, із точки зору рівня й рівномірності розподілу напружень, копструкції. Отримані результати, із подальшим параметричним синтезом, дають змогу модернізувати копструкцію та зменшити рівень її напруженості, тим самим підвищити надійність і безпеку експлуатації. Виявлені ділянки з максимальним рівнем напруженості дозволяють більш якісно проводити обстеження під час експлуатації, оскільки саме вони потребують більшої уваги.

### Наукова новизна та практична значимість

У роботі отримали подальший розвиток наявні методи проектування металокопструкцій порталних кранів. Уперше запропоновано методику проектування раціональних металокопструкцій за критеріями рівномірності розподілу напружень і плавності силового потоку, які уперше отримали наукове обґрунтування. Упе-

## МАШИНОБУДУВАННЯ

рше розроблені твердотільні моделі металоко-  
нструкції порталного крана, які дозволяють ви-  
значати закономірність розподілу напру-  
жень/навантажень і плавності силового потоку  
в них.

Розроблено та впроваджено просторову тве-  
рдотільну комп'ютерну модель порталу крана  
«Азовець». Запропоновано методику міцнісно-  
го аналізу й раціонального проектування мета-  
локонструкції порталних кранів. Подано нау-  
ково обгрунтовані рекомендації з ремонту  
й посиленню елементів порталу крана  
«Азовець». Результати теоретичних і практич-  
них досліджень використовують у ДВНЗ «При-  
азовський державний технічний університет»  
під час викладання навчальних курсів «Проек-  
тування металевих конструкцій ПТМ», «Осно-  
ви автоматизованого проектування машин»,  
«Автоматизоване проектування ПТМ», «Ре-  
монт, монтаж і змачення ПТМ».

**Висновки**

Моделювання навантаженого стану пор-  
тального крана й детальний аналіз напруженого  
стану металоко-нструкції, виконаний для місця  
з'єднання опори й балки, дозволяють ствер-

джувати, що місця концентрації максимальних  
напружень збігаються з фактичними місцями  
появи дефектів у них. Напружено-  
деформований стан елементів вказаної ділянки  
є досить складним, оскільки разом із напру-  
женнями стискання виникають напруження ро-  
зтягнення, які можуть взаємозмінюватися під  
час роботи.

Застосування наведеної методики дослі-  
дження напружено-деформованого стану ще на  
етапі проектування дозволить приймати більш  
вдалі, з точки зору забезпечення плавності си-  
лового потоку, конструкторські рішення, міні-  
мізувати масу конструкції за рахунок перероз-  
поділу матеріалу.

Подальший розвиток наведеної методики  
дозволить розробляти спрощені моделі для  
більш ефективного використання часу, ресурсів  
програмного забезпечення й комп'ютера, за-  
стосовувати програмне забезпечення, що реалі-  
зує методи топологічної оптимізації, а в майбу-  
тньому й адитивні технології [5–13] у виготов-  
ленні елементів конструкції підйомно-  
транспортних машин, приклади чого вже мож-  
на бачити в компанії Caterpillar [7].

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Андрощук, Г. О. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку / Г. О. Андрощук // Наука, технології, інновації. – 2017. – № 1. – С. 68–77.
2. Сагіров, Ю. Г. Сучасний стан та перспективи оптимізації проектування металоко-нструкцій порталних кранів / Ю. Г. Сагіров, В. В. Суглобов, В. В. Кухар // Наука та виробництво : міжвуз. темат. зб. наук. пр. – Маріуполь, 2018. – Вип. 19. – С. 59–68.
3. Сагіров, Ю. Г. Уточнений метод аналізу напружено-деформованого состояния колонны порталного крана / Ю. Г. Сагіров // Передовые научные разработки : Междунар. науч.-техн. конф. (Прага, 27 авг.–05 сент. 2012 г.). – Прага, 2012. – Т. 11 : Технические науки. Технология и спорт. – С. 38–40.
4. Справочник по кранам : в 2 т. / под общ. ред. М. М. Гохберга. – Ленинград : Машиностроение, 1988. – 2 т.
5. Bendsøe, M. P. Topology Optimization: Theory, Methods and Applications / M. P. Bendsøe, O. Sigmund. – Berlin ; Heidelberg : Springer-Verlag, 2004. – 370 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-05086-6>
6. Boyd, S. Distributed Optimization and Statistical Learning via the Alternating Direction Method of Multipliers / S. Boyd // Foundations and Trends® in Machine Learning. – 2010. – Vol. 3. – Iss. 1. – P. 1–122. doi: <https://doi.org/10.1561/22000000016>
7. Caterpillar opens 3D Printing & Innovation Accelerator at Illinois HQ [Електронний ресурс] / Identify3D. – Режим доступу: <https://identify3d.com/blog/caterpillar-opens-3d-printing-innovation-accelerator-at-illinois-hq/> – Назва з екрана. – Перевірено : 05.06.2019.
8. Deng, S. Multi-constrained topology optimization via the topological sensitivity / S. Deng, K. Suresh // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2015. – Vol. 51. – Iss. 5. – С. 987–1001. doi: <https://doi.org/10.1007/s00158-014-1188-6>
9. Design of shell-infill structures by a multiscale level set topology optimization method / Junjian Fu, Hao Li, Liang Gao, Mi Xiao // Computers & Structures. – 2019. – Vol. 212. – P. 162–172. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2018.10.006>



## МАШИНОБУДУВАННЯ

10. Grierson, D. E. Conceptual design optimization of engineering structures / D. E. Grierson, S. Khajepour // Recent advances in optimal structural design / S. A. Burns (Ed.). – Reston, VA : American Society of Civil Engineers, 2002. – P. 81–96.
11. Topology optimization of hierarchical lattice structures with substructuring / Zijun Wu, Liang Xia, Shuting Wang, Tielin Shi // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2018. – Vol. 345. – P. 345–602. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2018.11.003>
12. Wohlers, T. Additive manufacturing and 3D-printing state of the industry: Annual world-wide progress report [Електронний ресурс] / T. Wohlers. – Wohlers Associates, 2014. – 276 p. – Режим доступу: <https://wohlersassociates.com/2014-ExSum.pdf> – Назва з екрана. – Перевірено : 05.06.2019.
13. 5 things every manufacturer needs to know about 3d printing [Електронний ресурс] / Association of Equipment Manufacturers. – Режим доступу: <https://www.aem.org/news/february-2018/5-things-every-manufacturer-needs-to-know-about-3d-printing/> – Назва з екрана. – Перевірено : 05.06.2019.

Ю. Г. САГИРОВ<sup>1\*</sup>, В. В. СУГЛОБОВ<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Подъемно-транспортные машины и детали машин», ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87500, тел. +38 (096) 307 93 14, эл. почта [sagirov1978@ukr.net](mailto:sagirov1978@ukr.net), ORCID 0000-0002-8854-0639

<sup>2</sup>Каф. «Подъемно-транспортные машины и детали машин», ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87500, тел. +38 (067) 623 12 69, эл. почта [suglobov\\_v\\_v@ukr.net](mailto:suglobov_v_v@ukr.net), ORCID 0000-0003-1743-0894

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ И АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПОРТАЛА КРАНА

**Цель.** Основной целью данной работы является моделирование нагруженности портала при работе крана «Азовец», анализ фактического напряженно-деформированного состояния элементов металлоконструкции портала. Объектом исследования является закономерность распределения напряжений в элементах портала. **Методика.** Для достижения поставленной цели использованы методы: аналитических инженерных расчетов, имитационного моделирования, конечных элементов, визуально-оптический метод при обследовании состояния металлоконструкции крана. **Результаты.** С использованием CAD/CAE-системы было смоделировано нагруженное состояние металлоконструкции порталного крана и выполнен расчет ее на прочность методом конечных элементов. Приведены результаты расчетов и анализа напряженно-деформированного состояния. Полученная закономерность распределения напряжений в элементах колонны наглядно показала, что напряжения распределены неравномерно; напряженно-деформированное состояние элементов портала является достаточно сложным, неравномерным и требует модернизации. **Научная новизна.** Получили дальнейшее развитие существующие методы проектирования металлоконструкций порталных кранов. Впервые предложена методика проектирования рациональных металлоконструкций по критериям равномерности распределения напряжений и плавности силового потока, которые также впервые получили научное обоснование. Впервые разработаны твердотельные модели металлоконструкции порталного крана, которые позволяют определять закономерность распределения напряжений/нагрузок и плавности силового потока в них. **Практическая значимость.** Разработана и внедрена пространственная твердотельная компьютерная модель портала крана «Азовец». Предложена методика прочностного анализа и рационального проектирования металлоконструкции порталных кранов. Предложены научно обоснованные рекомендации по ремонту и усилению элементов портала крана «Азовец». Результаты теоретических и практических исследований могут быть использованы при преподавании учебных курсов «Проектирование металлических конструкций подъемно-транспортных машин», «Основы автоматизированного проектирования машин», «Автоматизированное проектирование ПТМ», «Ремонт, монтаж и смазки ПТМ». Например, данные результаты используют в ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет».

**Ключевые слова:** металлоконструкция; порталный кран; моделирование; нагруженность; метод конечных элементов; синтез; оптимизация

Y. H. SAHIROV<sup>1\*</sup>, V. V. SUGLOBOV<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Lifting-Transport Machines and Machine Parts», State Higher Educational Institution «Pryazovskyi State Technical University», Universitetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87500, tel. +38 (096) 307 93 14, e-mail sagirov1978@ukr.net, ORCID 0000-0002-8854-0639

<sup>2</sup>Dep. «Lifting-Transport Machines and Machine Parts», State Higher Educational Institution «Pryazovskyi State Technical University», Universitetska St., 7, Mariupol, Ukraine, 87500, tel. +38 (067) 623 12 69, e-mail suglobov\_v\_v@ukr.net, ORCID 0000-0003-1743-0894

## MODELING OF LOADING AND ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF PORTAL CRANE GANTRY ELEMENT

**Purpose.** The main purpose of this work is to simulate the gantry loading during operation of the Azovets portal crane, the analysis of the actual stress-strain state of the gantry metal structure elements. The object of the study is the pattern of stress distribution in the gantry elements. **Methodology.** To achieve this purpose the following methods were used: analytical engineering calculations, simulation modeling, finite elements, and visual-optical method for examining the state of the crane metal structure. **Findings.** The loaded state of the metal structure of the portal crane was modeled with the use of the CAD/CAE system and its strength was calculated by the finite element method. The results of calculations and analysis of the stress-strain state are given. The obtained regularity of stress distribution in the pillar elements clearly showed that the stresses are unevenly distributed. The stress-strain state of the portal elements is rather complicated, uneven and requires modernization. **Originality.** The existing methods for the metal structures design of portal cranes were further developed. For the first time, a methodology of designing rational metal structures according to the criteria of uniform stress distribution and smoothness of the power flow was proposed. For the first time, the criteria for assessing the uniformity of stress distribution and smoothness of power flow scientifically substantiated. For the first time, solid-state models of the portal crane metal structure were developed, which allow determining the pattern of stress/load distribution and smoothness of the power flow in them. **Practical value.** A spatial solid-state computer model of the Azovets portal crane and a methodology for strength analysis and rational design of the metal structure for portal cranes were developed and implemented. The recommendations for repair and strengthening of the gantry components of the Azovets portal crane were scientifically grounded. The results of theoretical and practical research are used in the State Higher Educational Institution «PSTU» in teaching the courses «Designing Metal Structures LTM», «Basics of Computer Aided Design of Machines», «Automated Designing LTM», «Repair, Installation and Lubricants LTM».

**Keywords:** metal construction; portal crane; modeling; workload; finite element method; synthesis; optimization

### REFERENCES

1. Androshchuk, H. O. (2017). Additive Technology: Prospects and Challenges 3d-Print. *Science, Technologies, Innovations, 1*, 68-77. (in Ukrainian)
2. Sahirov, Y., Suglobov, V., & Kukhar, V. (2018). Modern Condition and Perspectives of Optimization Projection of Metal Constructions of Portal Cranes. *Science and production, 19*, 59-68. (in Ukrainian)
3. Sagirov, Y. G. (2012). *Utochnennyi metod analiza napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kolonny portalnogo krana, Peredovye nauchnye razrabotki, Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya*. Praga. (in Russian)
4. Gokhberg, M. M. (Ed). (1988). *Spravochnik po kranam* (Vol. 1-2). Leningrad: Mashinostroenie. (in Russian)
5. Bendsoe, M. P., & Sigmund, O. (2004). *Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications*. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-05086-6> (in English)
6. Boyd, S. (2010). Distributed Optimization and Statistical Learning via the Alternating Direction Method of Multipliers. *Foundations and Trends® in Machine Learning, 3(1)*, 1-122. doi: <https://doi.org/10.1561/2200000016> (in English)
7. Caterpillar opens 3D Printing & Innovation Accelerator at Illinois HQ. *Identify3D*. Retrieved from <https://identify3d.com/blog/caterpillar-opens-3d-printing-innovation-accelerator-at-illinois-hq/> (in English)
8. Deng, S., & Suresh, K. (2014). Multi-constrained topology optimization via the topological sensitivity. *Structural and Multidisciplinary Optimization, 51(5)*, 987-1001. doi: <https://doi.org/10.1007/s00158-014-1188-6> (in English)

## МАШИНОБУДУВАННЯ

9. Fu, J., Li, H., Gao, L., & Xiao, M. (2019). Design of shell-infill structures by a multiscale level set topology optimization method. *Computers & Structures*, 212, 162-172. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2018.10.006> (in English)
10. Grierson, D. E., & Khajepour, S. (2002). Conceptual design optimization of engineering structures. In S. Burns (Ed.), *Recent advances in optimal structural design*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 81-95. (in English)
11. Wu, Z., Xia, L., Wang, S., & Shi, T. (2019). Topology optimization of hierarchical lattice structures with substructuring. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 345, 602-617. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2018.11.003> (in English)
12. Wohlers, T. (2014). *Additive manufacturing and 3D-printing state of the industry: Annual world-wide progress report*. Wohlers Associates. Retrieved from <https://wohlersassociates.com/2014-ExSum.pdf> (in English)
13. 5 things every manufacturer needs to know about 3d printing. *Association of Equipment Manufacturers*. Retrieved from <https://www.aem.org/news/february-2018/5-things-every-manufacturer-needs-to-know-about-3d-printing/> (in English)

Надійшла до редколегії: 24.01.2019

Прийнята до друку: 23.05.2019