

**ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНЬ ВИНИКАЮЧИХ В ГОЛВНІЙ БАЛЦІ МОСТОВОГО КРАНА
ЗА ДОПОМОГОЮ 3D МОДЕЛЮВАННЯ****Н. М. Фідровська**

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ORCID: 0000-0002-5248-273X**Є. Д. Слепужніков, Р. В. Пономаренко**

Національний університет цивільного захисту України

ORCID: 0000-0002-5449-3512; 0000-0002-6300-3108**І. С. Варченко**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

ORCID: 0000-0002-5284-9351

Проведено дослідження напружено-деформованого стану головної балки мостового крана за допомогою застосування 3D моделювання. Для дослідження виникаючих напружень під час переміщення вантажів різної маси, була побудована 3D модель головної балки мостового крана за допомогою програми SolidWorks. Ця модель повністю повторює за конструктивними параметрами оригінальну балку мостового електичного крана вантажопідйомністю 5 тон з прольотом 22,5 метра. Матеріал виготовлення головної балки мостового крана Ст09Г2С. Були задані граничні умови по закріпленню балки з додатком сил від вантажного візка з вантажем, що переміщується по рейках укріплених на верхньому поясі балки. Також були визначені напруження в місці кріплення датчиків при переміщенні візка з вантажем масою 500, 800 та 1800 кг. Після цього було простежено розподіл навантажень по головній балці при переміщенні візка вздовж всієї довжини балки.

Ключові слова: балка, напруження, вантаж, візок, мостовий кран, навантаження.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Інтенсивне впровадження механізації транспортних і вантажно-розвантажувальних робіт на виробництві та в будівництві сприяє зростаючій заміні ручної праці, при виконанні основних і допоміжних виробничих операцій на механізовану.

На сучасних виробничих підприємствах та в металургійній промисловості, підйомно-транспортне обладнання вже використовується не як допоміжне, а як невід'ємна частина основного, що працює в єдиному технологічному комплексі [1]. Конструкція і технічна характеристика таких машин визначаються призначенням і виробничим циклом технологічного процесу [2]. Ось чому, мостові крани являються найбільш застосовуваними вантажопідйомними машинами в умовах сучасного виробництва, а забезпечення їх надійної і безперебійної роботи являється досить актуальною задачею [3, 4].

В теперішній час досить суттєво змінилися конструктивні форми багатьох металевих кранових конструкцій [5–7]. Пошуки шляхів зниження ваги, а також вартості конструкцій при одночасному поліпшенні їх якості, привели до широкого впровадження листових коробчастих конструкцій замість гратчастих. А в гратчастих до значного збільшення замкнутих трубчастих профілів [8].

Напруження, які виникають в металоконструкціях під час здійснення технологічних операцій таких як підйом, опускання та переміщення вантажу по мосту крана вантажним візком, призводять до дефектів в структурі металу [9, 10]. Ці дефекти з'являються у вигляді мікротріщин і тріщин та вигинів в металоконструкції крана [11, 12].

Чинники, які призводять до виникнення сил перекосу й руйнування окремих вузлів металоконструкцій, таких як кінцеві та головні балки, були розглянуті в роботі [13]. Запропоновані декілька методів поліпшення роботи кранових металевих конструкцій. А саме, застосування гідродинамічних та гідро-

статичних приводів в механізмах пересування та повороту кранів. Також впровадження в металевих конструкціях нових карбідо-інітридоутворюючих сплавів заліза з показниками границі текучості в 4–5 разів більшими, ніж Ст3. Впровадження на заводах-виробниках останніх досліджень в галузі лазерної техніки. Впровадження висококомірних болтів та електрозаклепок для з'єднання головних і кінцевих балок. Також в цій роботі сказано, що ці методи поліпшать роботу кранових металевих конструкцій. Але не наведено порівняння пікових напружень в металоконструкціях кранів під час застосування деяких методів.

Дослідження кінцево-елементної моделі металоконструкції мостового крана і статичний аналіз методом кінцевих елементів для отримання напруження в небезпечній точці металоконструкції розглянуто в роботах [14, 15]. За допомогою ортогонального дизайну змодельовані випадкові величини напружень в небезпечній точці. Розроблено новий метод точного кількісного аналізу і проектування металоконструкції мостового крана. Також автори стверджують що розроблений ними метод може значно скоротити витрати на проектування мостового крана, але не вказують точні дані зменшених витрат.

В роботі [16] запропоновано структуру мультидисциплінарної оптимізації мостового крана. Представлено дослідження мультидисциплінарної технології проектування кранів. Встановлено оптимальну математичну модель крана для оптимізації його металоконструкції. Також є ствердження, що структура мультидисциплінарної оптимізації мостового крана за допомогою кінцево-елементного аналізу і динамічного моделювання, може забезпечити жорсткість металоконструкції, що дозволить витримати виникаючі в ній напруження. Так само ця структура мультидисциплінарної оптимізації збільшує міцність і інші характеристики крана. Результати дослідження показують, що оптимізація металоконструк-

ції може значно знизити загальну масу крана. Зменшення маси крана призведе до економії коштів на його виробництві. Але експериментальне дослідження було проведено тільки на 3D моделі мостового крана. Досліджень на мостовому крані будь-якого виробничого підприємства в реальних умовах не було проведено.

Оптимізація металокопструкції крана зі звареною коробчастою секцією балки розглянута в роботі [17]. Оптимізація металокопструкції здійснюється шляхом зміни розмірів секцій крана, а також положенням вантажного візка на балці. Цей спосіб включає порівняння існуючих аналітичних результатів з даними, отриманими за допомогою програмного забезпечення для аналізу методом кінцевих елементів і моделювання. Основна увага в роботі приділяється модифікації існуючої металокопструкції крана. Зменшуються розміри поперечного перерізу балки крана для мінімізації використання матеріалу при його виготовленні, що знижує його вартість. При розробці методології кінцевих елементів бралися до уваги напруження зсуву, повна деформація, максимальне головне напруження і мінімальне головне напруження для оптимізації проекту. Оптимізація включає зміну таких параметрів металокопструкції, як розмір і товщину пластин.

Модернізована балка, ефективна з точки зору техніки проектування і підтверджена як економічна завдяки зниженню її ваги на 8,39% в порівнянні з існуючою копструкцією. Але інші методи оптимізації металокопструкції крана в роботі не розглянуто.

Аналітичний розрахунок металокопструкції мостового крана виконано в роботі [18]. Були визначені максимальні напруження вигину і прогину головної балки. Також були розраховані параметри і створена модель крана в програмному забезпеченні. Модель крана була проаналізована за допомогою методу кінцевих елементів. Тільки після проведених перевірок металокопструкції крана за допомогою програмного забезпечення, була виготовлена його лабораторна фізична модель. І як стверджують автори, подальші дослідження будуть проводитись на цій лабораторній моделі.

Під час огляду літературних джерел [1–18] були виявлені деякі питання, які в дійсний час ще не досліджені іншими авторами. Це дозволило сформулювати напрямок дослідження щодо реєстрації виникнення напружень в металокопструкції мостового крана.

Мета роботи – дослідження напружено-деформованого стану головної балки мостового крану за допомогою застосування 3D моделювання.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Для дослідження виникаючих напружень під час переміщення вантажів різної маси, побудуємо 3D модель головної балки мостового крана за допомогою програми SolidWorks 2015 (рис. 1).

Дана модель повністю повторює за конструктивними параметрами оригінальну балку мостового електричного крана вантажопідйомністю 5 тон з прольотом 22,5 метра, виготовленого на Олександрійському заводі підйомно-транспортного устаткування. Матеріал виготовлення Ст09Г2С.

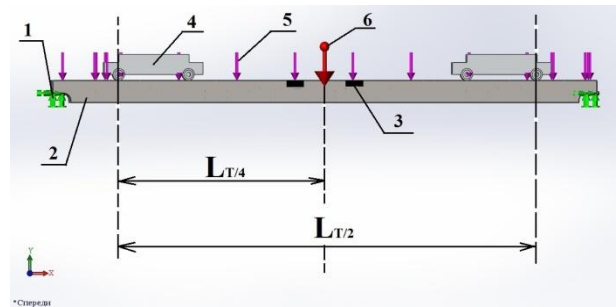


Рисунок 1 – 3D модель головної балки мостового крана

На рис. 1 представлено:

- 1 – умови кріплення балки – фіксована геометрія;
- 2 – головна балка мостового крана;
- 3 – тензометричний датчик;
- 4 – вантажний візок крана;
- 5 – сили, що діють на балку від вантажного візка з вантажем;
- 6 – сила тяжіння від власної ваги балки і вантажного візка;
- $L_T/2$ – довжина переміщення вантажного візка по головній балці з крайнього лівого в крайнє праве положення.

Наведемо складові одиниці копструкції головної балки мостового крана.

Балка складається з верхнього і нижнього поясів, внутрішніх великих і малих діафрагм, профільної прямокутної труби, а також з дугової копструкції, що з'єднує нижній пояс з верхнім способом заглибки.

Задаємо всі граничні умови по закріпленню балки з додатком сил від вантажного візка з вантажем, що переміщується по рейках укріплених на верхньому поясі балки (рис. 2). Приймаємо, що балка нерухомо закріплена на 2-х опорах.

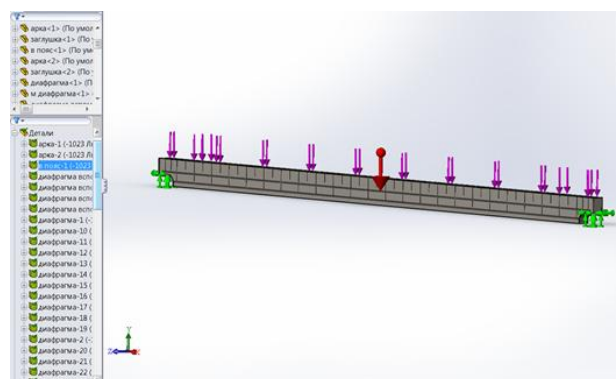


Рисунок 2 – Навантаження і умови кріплення балки

Визначимо напруження в місці кріплення датчиків при переміщенні візка з вантажем масою 500 кг. Також простежимо розподіл навантаження по головній балці при переміщенні візка вздовж всієї довжини балки.

Виділимо етапи:

- 1 – підйом вантажу;
- 2 – переміщення вантажного візка з крайнього лівого положення до центру балки де встановлені датчики;
- 3 – вантажний візок з вантажем знаходиться в центрі балки, безпосередньо над датчиками;
- 4 – вантажний візок переміщується в крайнє праве положення.

Попередньо простежимо розподіл напружень від складової ваги балки і вантажного візка без вантажу.

Як бачимо, що від власної ваги в середині прогону, де встановлені тензометричні датчики (рис. 3) напруження складають 3 МПа.

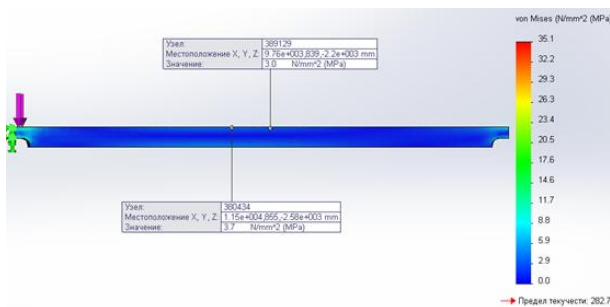


Рисунок 3 – Місця кріплення тензометричних датчиків на головній балці мостового крана

Далі простежимо розподіл напружень при підйомі вантажу масою 500 кг., вантажним візком, що знаходиться в крайньому лівому положенні (рис. 4).

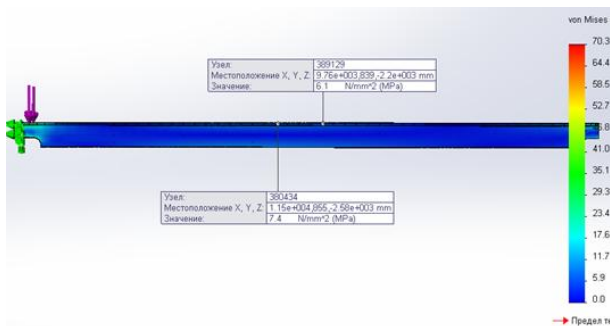


Рисунок 4 – Підйом вантажу масою 500 кг

У симуляції, в місцях кріплення датчиків, ми отримали напруження в металоконструкції крана приблизно 7 МПа.

Переміщення в головній балці (рис. 5) склали 3,5 мм., що в межах допуску.

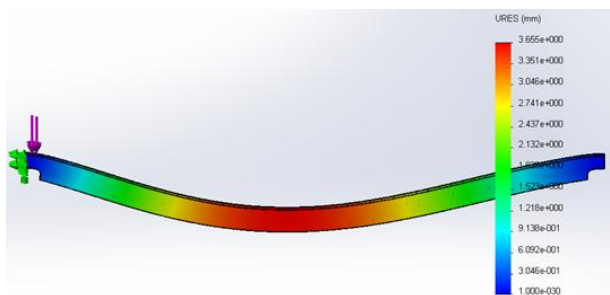


Рисунок 5 – Переміщення в головній балці

Далі проведемо симуляцію 2-го етапу, переміщення вантажного візка з крайнього лівого положення до центру балки, де встановлені датчики (рис. 6). Врахуємо закон розподілу навантаження від коліс вантажного візка по головній балці мостового крана. У симуляції вкажемо нерівномірності розподілу навантаження по довжині балки.

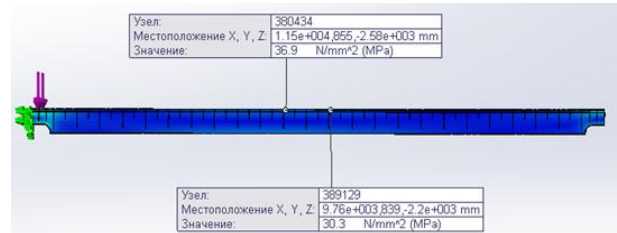


Рисунок 6 – Переміщення вантажного візка по головній балці

Виходячи з симуляції руху вантажного візка з вантажем масою 500 кг., від крайнього лівого положення до середини прольотного перетину, напруження на датчиках збільшуються, тому візьмемо середні значення, які складають 33 МПа.

Далі проведемо симуляцію напруженого стану головної балки, коли вантажний візок з вантажем масою 500 кг., знаходиться в середині прольотного перетину (рис. 7).

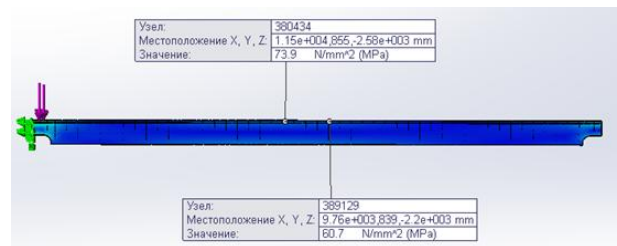


Рисунок 7 – Вантажний візок з вантажем в середині прольотного перетину балки

Датчики, при такому положенні вантажного візка з вантажем 500 кг., реєструють напруження в розмірі 65 МПа, а пікові напруження складають 74 МПа.

Далі розглянемо симуляцію під час підйому та переміщення вантажу масою 800 кг. (рис. 8).

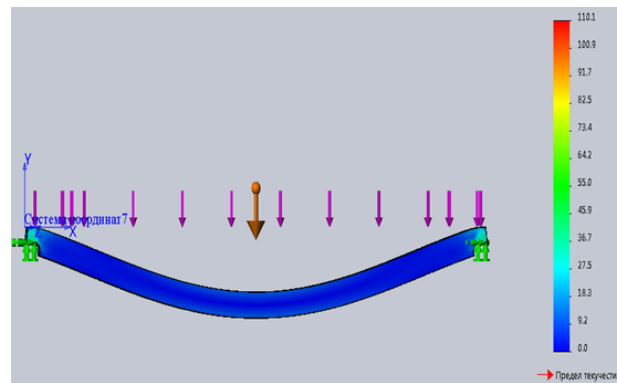


Рисунок 8 – Розподіл навантаження і напруження на балці при підйомі вантажу масою 800 кг

Розподіл навантаження проходить за таким же принципом що і в розглянутих вище варіантах. Максимальні напруження виникають в місці кріплення кінцевий і головної балки мостового крана.

У місцях виміру (де були встановлені тензодатчики) пікові напруження склали 74 МПа.

Завершальним етапом проведення експерименту була симуляція підйому та переміщення вантажу масою 1800 кг. (рис. 9).

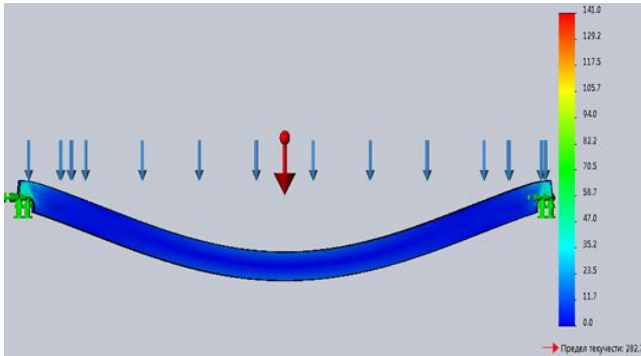


Рисунок 9 – Розподілення навантаження від маси вантажу 1800 кг

Напруження, що виникають в місці вимірювання дорівнюють 80 МПа.

Пікові напруження, що виникають в місцях кріплення головної і кінцевих балок складають 140 МПа. ВИСНОВКИ. Дослідження напружено-деформованого стану головної балки мостового крану за допомогою 3D моделювання проведено в повному обсязі.

В подальшому необхідно провести натурний експеримент. Дані натурного експерименту необхідно порівняти з даними, отриманими за допомогою 3D моделювання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Castro J. C., Palafox E. H., Gómez L. H., Mendoza G. S., Grijalba Y. L., López P. R. Analysis of the structural girders of a crane for the license renewal of a BWR Nuclear Power Plant. *Procedia Structural Integrity*. 2019. № 17. P. 115–122. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.08.016.
2. Fidrovskaya N., Slepuzhnikov E., Perevoznik I. A contact problem solution with taking into account shear deformations. *Science and Education a New Dimension*. 2019. № 193. P. 80–81. DOI: 10.31174/SEND-NT2019-193VII23-20.
3. Слєпужніков Є. Д., Фідровська Н. М. Використання кранів мостового типу в сучасній промисловості. *Збірник наукових праць ЛОНОС*. 2020. Vol. 3 Europäische Wissenschaftsplattform. С. 96–97. DOI: 10.36074/05.06.2020.v3.40.
4. Сапон М. М., Горбаченко О. В., Кондратьєв С. М., Крицький В. Б., Маяцький В. Д., Медведєв В. І., Смишляєва С. П. Запобігання пошкодженням відпрацьованого ядерного палива під час транспортно-технологічних операцій. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2020. № 2(86), С. 62–71. DOI: 10.32918/nrs.2020.2(86).08.
5. Spruogis B., Jakstas A., Turla V., Iljin I., Sesok N. Dynamic reaction forces of an overhead crane on lifting. *TRANSPORT*. 2011. № 26(3). P. 279–283. DOI: 10.3846/16484142.2011.622144.
6. Qin, Y., Jiang, J., Yang, H. High precision analysis of stress concentration in girder structure of casting crane. *International Journal of Science and Qualitative Analysis*. 2016. № 2(2). P. 14–18. DOI: 10.11648/j.ijjsqa.20160202.11.
7. Frankovsky P., Delyova I., Sivak, P., Kurylo P., Pivarciova E., Neumann V. Experimental assessment of time-limited operation and rectification of a bridge crane. *Materials*. 2020. № 13. P. 1–12. DOI: 10.3390/ma13122708.
8. Курпе О. Г., Кухар В. В. Дослідження процесів рекристалізації в умовах термомеханічного процесу прокатки сталі марки Х65. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2020. № 2/2020 (121). С. 122–128. DOI: 10.30929/1995-0519.2020.2.122-128.
9. Kutsenko L., Semkiv O., Kalynovskyi A., Zapolskiy L., Shoman O., Virchenko G., Martynov V., Zhuravskij M., Danylenko V., Ismailova N. Development of a method for computer simulation of a swinging spring load movement path. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 1. P. 60–73. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.154191.
10. Kutsenko L., Vanin V., Shoman O., Yablonskiy P., Zapolskiy L., Hrytsyna N., Nazarenko S., Danylenko V., Sivak E., Shevchenko S. Modeling the resonance of a swinging spring based on the synthesis of a motion trajectory of its load. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 3. P. 53–64. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.168909.
11. Nischeta S. A., Chernyshova E. P., Narkevich M. Y., Krishan A. L., Sagadatov A. I. Damage of bridge lifting cranes and crane metal structures. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017. № 12(23). P. 6587–65890.
12. Antsev V. Y., Tolokonnikov A. S., Vorobev A. V., Sakalo V. I. Methods of determining the margin of cyclic crack resistance of metal structures for hoisting machinery. *Materials Science and Engineering*. 2017. № 177. P. 1–5. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012096.
13. Григоров О. В., Аніщенко Г. О., Петренко Н. О., Стрижак В. В., Турчин О. В., Радченко В. С., Окунь А. О., Глушкова М. Ю. Поліпшення роботи кранових металевих конструкцій шляхом застосування гідроприводу та деяких інших рішень в механізмах пересування та повороту. *Підйомно-транспортна техніка*. 2019. № 2(61). С. 4–25.
14. Meng W., Yang Z., Qi X., Cai J. Reliability analysis-based numerical calculation of metal structure of bridge crane. *Mathematical Problems in Engineering*. 2013. № 2013. P. 1–5. DOI: 10.1155/2013/260976.
15. Haniszewski, T. Strength analysis of overhead traveling crane with use of finite element method. *Transport problems*. 2014. № 9(1). P. 19–26.
16. Tong Y., Ye W., Yang Z., Li D., Li X. Research on multidisciplinary optimization design of bridge crane. *Mathematical Problems in Engineering*. 2013. № 2013. P. 1–10. DOI: 10.1155/2013/763545.

17. Patel H., Upadhyay D., Patel D. Design optimization of box girder in gantry crane using finite element analysis software. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2020. № 07(08). P. 1906–1917.

18. Delic M., Colic M., Mesic E., Pervan N. Analytical calculation and fem analysis main girder double girder bridge crane. *TEM Journal*. 2017. № 6(1). P. 48–52. DOI: 10.18421/TEM61-07.

RESEARCH OF VOLTAGE ARISING IN THE MAIN BEAM OF THE BRIDGE CRANE USING 3D MODELING

N. Fidrovska

Kharkiv National Automobile and Highway University

ORCID: 0000-0002-5248-273X

E. Slepuzhnikov, R. Ponomarenko

National University of Civil Defence of Ukraine

ORCID: 0000-0002-5449-3512; 0000-0002-6300-3108

I. Varchenko

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

ORCID: 0000-0002-5284-9351

Purpose. The article investigates the stress-strain state of the main girder of an overhead crane using 3D modeling. **Methodology.** To study the stresses that arise when moving loads of various masses, a 3D model of the main beam of an overhead crane was built using the SolidWorks software. This model completely repeats the design parameters of the original beam of an electric overhead crane with a lifting capacity of 5 tons and a span of 22.5 meters. Manufacturing material of the main girder of the St09G2S overhead crane. Boundary conditions are set for securing the beam with the application of forces from a freight carriage with a load along the rails fixed on the upper chord of the beam. The stresses were also determined at the place of attachment of the sensors when moving the trolley with a load of 500, 800 and 1800 kg. After that, the distribution of loads along the main beam was traced when the carriage moved along the entire length of the beam. **Results.** A simulation of the second stage was carried out, moving the load cart from the extreme left position to the center of the beam, where the sensors are installed. During the simulation of the second stage, the law of distribution of the load from the wheels of the truck trolley along the main beam of the overhead crane was taken into account. The simulation also indicated the uneven distribution of the load along the length of the beam. Based on the simulation of the movement of a load trolley with a load of 500 kg, from the extreme left position to the middle of the span, the stresses arising in the main girder of the overhead crane were determined. **Originality.** A simulation was considered during lifting and moving a load weighing 800 kg. The distribution of the load was carried out according to the same principle as in the above options. The maximum stresses occurred at the point of attachment of the final and main girders of the overhead crane. At the measurement points, the peak stresses were 74 MPa. The final stage of the experiment was the simulation of lifting and moving a load weighing 1800 kg. The stresses at the measurement site were 80 MPa. Peak stresses arising at the attachment points of the main and end beams were 140 MPa. **Practical value.** The obtained results of 3D modeling can be taken into account in the design and manufacture of the overhead crane metal structure. **Conclusions.** The study of the stress-strain state of the main girder of an overhead crane using 3D modeling was carried out in full. In the future, it is necessary to conduct a full-scale experiment. The data of the field experiment must be compared with the data obtained using 3D modeling.

Key words: beam, tension, cargo, trolley, overhead crane, load.

REFERENCES

1. Castro, J. C., Palafox, E. H., Gómez, L. H., Mendoza, G. S., Grijalba, Y. L., López, P. R. (2019). Analysis of the structural girders of a crane for the license renewal of a BWR Nuclear Power Plant. *Procedia Structural Integrity*. No. 17, pp. 115–122. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.08.016.

2. Fidrovska, N., Slepuzhnikov, E., Perevoznik, I. (2019). A contact problem solution with taking into account shear deformations. *Science and Education a New Dimension*. No. 193, pp. 80–81. DOI: 10.31174/SEND-NT2019-193VII23-20.

3. Slepuzhnikov, E. D., Fidrovska, N. M. (2020). Vykorystannia kraniv mostovoho typu v suchasniy promyslovosti. *Tendenze attuali della moderna ricerca scientifica: der Sammlung wissenschaftlicher Arbeiten «ΛΟΓΟΣ» zu den Materialien der internationalen wissenschaftlich-praktischen Konferenz. Europäische Wissenschaftsplattform*, Stuttgart, pp. 96–97. DOI: 10.36074/05.06.2020.v3.40.

4. Sapon, M. M., Horbachenko, O. V., Kondratiev, S. M., Krytskyi, V. B., Maiatskyi, V. D., Medvediev, V. I., Smyshliaieva, S. P. (2020). Prevention of damage to spent nuclear fuel during transport and technological operations. *Nuclear and radiation safety*. No 2(86), pp. 62–71. DOI: 10.32918/nrs.2020.2(86).08.

5. Spruogis, B., Jakstas, A., Turla, V., Iljin, I., Sesok, N. (2011). Dynamic reaction forces of an overhead crane on lifting. *TRANSPORT*. No 26(3), pp. 279–283. DOI: 10.3846/16484142.2011.622144.

6. Qin, Y., Jiang, J., Yang, H. (2016). High precision analysis of stress concentration in girder structure of casting crane. *International Journal of Science and Qualitative Analysis*. No. 2(2), pp. 14–18. DOI: 10.11648/j.ijsqa.20160202.11.

7. Frankovsky, P., Delyova, I., Sivak, P., Kurylo, P., Pivarciova, E., Neumann, V. (2020). Experimental assessment of time-limited operation and rectification of a bridge crane. *Materials*. No. 13, pp. 1–12. DOI: 10.3390/ma13122708.

8. Kurpe, O., Kukhar, V. (2020). Recrystallization processes research in conditions of thermomechanical rolling process of steel grade X65. *Visnyk KrNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho*. No. 2(121), pp. 122–128. DOI: 10.30929/1995-0519.2020.2.122-128.
9. Kutsenko, L., Semkiv, O., Kalynovskyi, A., Zapolskiy, L., Shoman, O., Virchenko, G., Martynov, V., Zhuravskij, M., Danylenko, V., Ismailova, N. (2019). Development of a method for computer simulation of a swinging spring load movement path. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. No. 1, pp. 60–73. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.154191.
10. Kutsenko, L., Vanin, V., Shoman, O., Yablonskiy, P., Zapolskiy, L., Hrytsyna, N., Nazarenko, S., Danylenko, V., Sivak, E., Shevchenko, S. (2019). Modeling the resonance of a swinging spring based on the synthesis of a motion trajectory of its load. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. No. 3, pp. 53–64. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.168909.
11. Nischeta, S. A., Chernyshova, E. P., Narkovich, M. Y., Krishan, A. L., Sagadatov, A. I. (2017). Damage of bridge lifting cranes and crane metal structures. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. No. 12(23), pp. 6587–65890.
12. Antsev, V. Y., Tolokonnikov, A. S., Vorobev, A. V., Sakalo, V. I. (2017). Methods of determining the margin of cyclic crack resistance of metal structures for hoisting machinery. *Materials Science and Engineering*. No 177, pp. 1–5. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012096.
13. Hryhorov, O. V., Anishchenko, H. O., Petrenko, N. O., Stryzhak, V. V., Turchyn, O. V., Radchenko, V. S., Okun, A. O., Hlushkova, M. Yu. (2019). Improving the operation of crane metal structures by using a hydraulic drive and other solutions in movement and swing mechanisms. *Hoisting and Conveying Equipment*. No. 2(61), pp. 4–25.
14. Meng, W., Yang, Z., Qi X., Cai J. (2013). Reliability analysis-based numerical calculation of metal structure of bridge crane. *Mathematical Problems in Engineering*. No. 2013, pp. 1–5. DOI: 10.1155/2013/260976.
15. Haniszewski, T. (2014). Strength analysis of overhead traveling crane with use of finite element method. *Transport problems*. No. 9(1), pp. 19–26.
16. Tong Y., Ye W., Yang Z., Li D., Li X. (2013). Research on multidisciplinary optimization design of bridge crane. *Mathematical Problems in Engineering*. No. 2013, pp. 1–10. DOI: 10.1155/2013/763545.
17. Patel, H., Upadhyay, D., Patel, D. (2020). Design optimization of box girder in gantry crane using finite element analysis software. *International Research Journal of Engineering and Technology*. No. 07(08), pp. 1906–1917.
18. Delic, M., Colic, M., Mesic, E., Pervan, N. (2017). Analytical calculation and fem analysis main girder double girder bridge crane. *TEM Journal*. No. 6(1), pp. 48–52. DOI: 10.18421/TEM61-07.

Стаття надійшла 04.01.2021.