

УДК 621.87

DOI: 10.15276/pidtt.1.62.2020.05

Ткачов О. А., Ткачов А. В.

Одеський національний політехнічний університет

ВПЛИВ ХАРАКТЕРУ ДІЇ ЗОВНІШНЬОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ЖОРСТКІСТЬ ГОЛОВНИХ БАЛОК МОСТОВИХ КРАНІВ

***Анотація.** В даній роботі розглядаються питання, які пов'язані з підвищенням несучої здатності прольотних балок кранів мостового типу методом попереднього напруження. Розв'язок задачі полягає у використанні нового схемного рішення по розвантаженню головних балок крана та дослідженню їх статичної жорсткості за будь-якого місця тимчасового навантаження. Наведена математична модель мостового крана із задалегідь напруженими балками, яка базується на загальній теорії стійкості пружних систем. В даній роботі були отримані рівняння кривої прогинів цієї балки, які дозволили розглянути та проаналізувати вплив ексцентрично подовжніх сил на її напружено-деформований стан. За результатами отриманих рівнянь було проведено дослідження статичної жорсткості головної балки в залежності від характеру дії зовнішнього тимчасового навантаження.*

Аналіз отриманих результатів виявив, що використання запропонованого схемного рішення дозволяє до мінімуму зменшити вигини прольотної будівлі при знаходженні візка з вантажем над опорою. Крім того, виявлено, що при роботі мостового крана з вантажем у середині прольоту прогини прольотної будови не виходять за межі регламентованих прогинів звичайного кранового моста. Що позитивно впливає на деформаційний стан головної балки та полегшує роботу крана в цілому.

Отримані у даній роботі результати можуть бути у подальшому використані для модернізації кранів з метою підвищення їх вантажопідйомності, поширення терміна їх служби без демонтажу, а також для вдосконалення існуючих конструкцій та інженерних методів розрахунку як на стадіях їх проектування, так і в умовах реальної експлуатації.

Ключові слова: мостовий кран, несуча здатність, попереднє напруження, головні балки, статична жорсткість, деформаційний стан.

Постановка проблеми. В кранах мостового типу з підвищеною несучою здатністю прольотні попередньо-напружені головні балки

одержують вигін, зворотний направленню прогину від навантаження. Такі балки мають меншу площу перетину і, відповідно, менший момент інерції. Узагальнене зусилля, що розвантажує крановий міст не залежить від положення зовнішнього навантаження та його величини. Внаслідок чого вони більш деформаційні ніж звичайні кранові мости та мають ряд істотних недоліків [1-3]. Особливо негативним недоліком є випадок, коли рухомий візок з вантажем знаходиться над опорою або біля неї. При цьому зворотні вигини попередньо-напруженого моста значно зростають і можуть перевищувати допустимі прогини балки [4]. Зменшення величини вигину значно покращило б умови роботи прольотної балки та крану в цілому. Тому питання, пов'язані з дослідженням деформованої поведінки кранового моста відповідно до реальних умов його роботи, є актуальними. Так як на кранову балку одночасно діють ексцентрично подовжні сили та поперечне навантаження, то деформовану поведінку кранового моста може бути досліджено шляхом розгляду кривої прогинів цієї балки. Крім того, величина вигинів головної балки в залежності від положення та закону зміни зовнішнього навантаження повинна регламентуватися.

Аналіз публікацій по темі досліджень. Проведений аналіз публікацій показує [1, 5-7], що в конструктивних та розрахункових схемах мостових кранів з попередньо напруженими головними балками осьові ексцентричні сили S завжди знаходяться на одній лінії дії - лінії розташування затяжки. Внаслідок чого, в місцях кріплення анкерних пристроїв на балку діють згинальні моменти однієї величини, що негативно впливає на її деформовану поведінку і приводить до значних її вигинів при відомих випадках розташування рухомого робочого навантаження. Крім того, розрахунковий прогин головної балки визначається як різниця прогинів від дії поперечних сил та прогином (вигином) балки від дії подовжніх зусиль попереднього напруження та самонапруження в затяжці. Звернемо увагу, що попередньо напружені балки відносяться до систем, які не підпорядковуються принципу суперпозиції. Тому такий підхід для визначення прогинів (вигинів) не завжди буде коректним, а розрахунок деформацій може дати тільки приблизні результати, який неможливо використовувати при дослідженні.

Мета даного дослідження. Мета роботи полягає в пропонуванні та обґрунтуванні нових конструктивних рішень по розвантаженню попередньо напружених кранових мостів, які зменшують вигини прольотних балок в залежності від характеру дії зовнішнього навантаження. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі: 1) побудувати, для запропонованого схемного рішення, математичну модель мостового крана із заздалегідь напруженими головними балками; 2) розглянути та проаналізувати вплив ексцентрично подовжньої сили на деформовану

поведінку головної балки; 3) провести дослідження по деформаційному стану кранового моста відповідно до умов його роботи; 4) провести аналіз отриманих результатів.

Виклад основного матеріалу. Запропонована для дослідження конструктивна та розрахункова схеми мостового крана наведені на рис.1. Анкерні блоки з запасованим на них вантажним канатом розташовані на різних відстанях h_1 та h_2 від лінії прикладання ексцентрично подовжньої сили S до нейтральної вісі згину балки. Внаслідок чого в місцях кріплення анкерних пристроїв, відповідно, на лівому та правому кінцях балки, діють зосереджені, протилежні за знаком від робочого навантаження F , моменти M_1 та M_2

$$M_1 = h_1 S,$$

$$M_2 = h_2 S.$$

З рис. 1 видно, що $h_1 > h_2$, внаслідок чого і $M_1 > M_2$. Це дозволяє зменшити, при мінімальних конструктивних змінах, величину розвантажувальних моментів у порівнянні зі звичайною заздалегідь напруженою прольотною балкою. Внаслідок чого, при знаходженні навантаження над опорою вигини кранового моста будуть зменшені. Крім того, при роботі вантажу в прольотній частині крану прогини головної балки збільшуються. Позитивним використанням цієї схеми можна було би вважати, коли деформації балки не виходили би за межі прогинів від робочого навантаження звичайного моста крана. Це питання може бути досліджено шляхом розгляду математичного моделювання прольотної балки за допомогою рівнянь її кривих деформацій. При побудові математичної моделі вважаємо, що усі елементи крана тверді тіла, балка працює в пружній стадії, опирається на ідеальні шарніри, згин її здійснюється в площині підвісу вантажу. Тоді, враховуючі відомі з теорії стійкості пружних систем [8] вирази кривих деформацій балки при подовжньо-поперечному згину, отримаємо диференціальні рівняння стрілки прогинів для лівої частині балки при $0 \leq x \leq (L - \rho)$

$$EI \frac{d^2 f_1}{dx^2} = -\frac{F\rho}{L} x - f_1 S + M_1$$

Аналогічно, для правої частини балки, при $L \geq x \geq (L - \rho)$, відповідне диференціальне рівняння має вигляд

$$EI \frac{d^2 f_2}{dx^2} = -\frac{F(L - \rho)(L - x)}{L} - f_2 S + M_2,$$

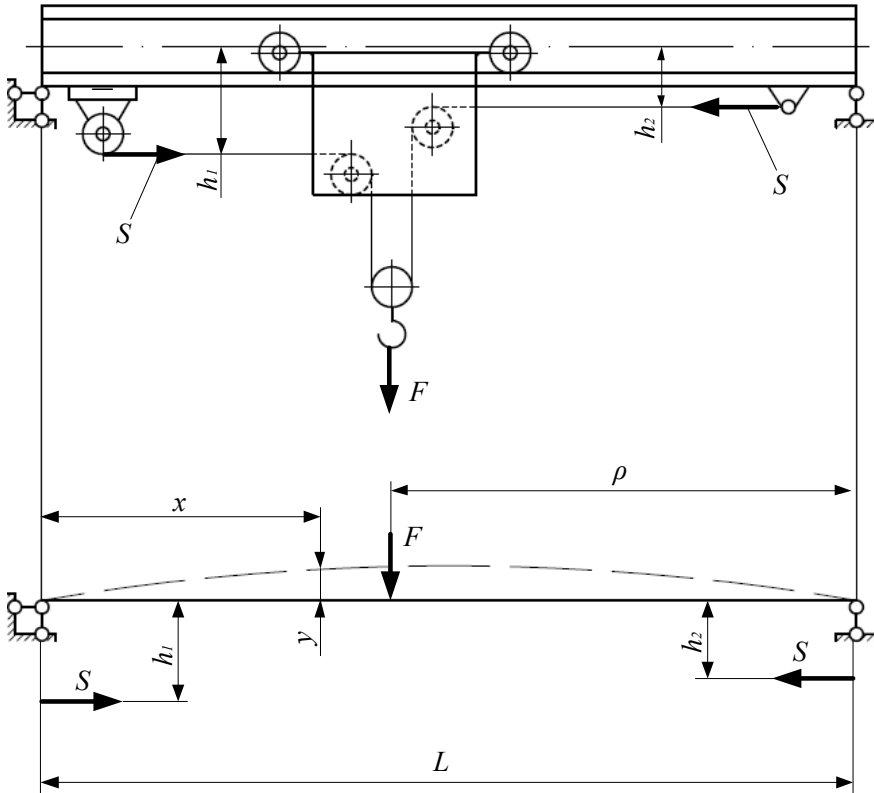


Рис. 1

де EI - згинальна жорсткість прольотного моста в площині підвісу вантажу; L - довжина балки; x - поточна координата місця визначення прогинів або вигинів f_1 та f_2 ; ρ - відстань від правої опори балки до місця дії поперечного навантаження F ; S - ексцентрична стискувальна сила.

Для спрощення позначимо:

$$z^2 = \frac{S}{EI}$$

Тоді, вище приведені диференційні рівняння будуть мати вигляд, для ділянки $0 \leq x \leq (L - \rho)$

$$\frac{d^2 f_1}{dx^2} + z^2 f_1 = -\frac{F\rho}{L}x + z^2 h_1.$$

Для ділянки $L \geq x \geq (L - \rho)$

$$\frac{d^2 f_2}{dx^2} + z^2 f_2 = -\frac{F(L - \rho)}{L}(L - x) + z^2 h_2$$

Повні інтеграли цих рівнянь мають вигляд, відповідно

$$f_1 = C_1 \cos zx + C_2 \sin zx + f_1^*$$

$$f_2 = C_3 \cos zx + C_4 \sin zx + f_2^*,$$

де f_1^* , f_2^* - частинні рішення диференціальних рівнянь

$$f_1^* = -\frac{F\rho x}{SL} + h_1, \quad f_2^* = -\frac{F(L-\rho)(L-x)}{SL} + h_2$$

Постійні інтегрування C_1, C_3 визначим з умов на кінцях балки, де прогини дорівнюють нулю:

$$(f_1)_{x=0} = 0, \quad \text{тоді} \quad C_1 = -h_1,$$

$$(f_2)_{x=L} = 0, \quad \text{тоді} \quad C_3 = -C_4 \operatorname{tgz}L - \frac{h_2}{\cos zL}$$

Постійна інтегрування C_2 була знайдена з наступної умови - в місці дії сили F обидві ділянки кривої деформації балки, які визначені відповідно вищенаведеними рівняннями, мають однаковий прогин

$$(f_1)_{x=L-\rho} = (f_2)_{x=L-\rho}$$

Тоді,

$$C_1 \cos z(L-\rho) + C_2 \sin z(L-\rho) - \frac{F\rho}{SL}(L-\rho) + h_1 = C_3 \cos z(L-\rho) + C_4 \sin z(L-\rho) - \frac{F\rho}{SL}(L-\rho) + h_2$$

Звідкіля маємо

$$C_2 = \frac{1}{\sin z(L-\rho)} ((\sin z(L-\rho) - \operatorname{tgz}L \cdot \cos z(L-\rho))C_4 + h_2(1 - \frac{\cos z(L-\rho)}{\cos zL}) + h_1(\cos z(L-\rho) - 1))$$

Для спрощення позначимо

$$A = \sin z(L-\rho) - \operatorname{tgz}L \cdot \cos z(L-\rho),$$

$$B = h_2(1 - \frac{\cos z(L-\rho)}{\cos zL}) + h_1(\cos z(L-\rho) - 1)$$

Тоді, вираз для визначення постійної інтегрування C_2 буде мати наступний остаточний вигляд

$$C_2 = \frac{C_4 A + B}{\sin z(L-\rho)}$$

Постійна інтегрування C_4 знайдена з умови, що обидві ділянки кривої деформації моста крана мають спільну дотичну

$$(f_1')_{x=L-\rho} = (f_2')_{x=L-\rho}$$

Тоді

$$-zC_1 \sin z(L - \rho) + zC_2 \cos z(L - \rho) - \frac{F\rho}{SL} = -zC_3 \sin z(L - \rho) + zC_4 \cos z(L - \rho) + \frac{F(L - \rho)}{SL}$$

Звідкіля маємо

$$C_4 = \frac{\sin z(L - \rho) \left(\frac{h_2}{\cos zL} - h_1 \right) - B \operatorname{ctg} z(L - \rho) + \frac{F}{zS}}{A \operatorname{ctg} z(L - \rho) - \operatorname{tg} zL \sin z(L - \rho) - \cos z(L - \rho)}$$

Після підставлення постійних інтегрування $C_1 - C_4$ у відповідні рівняння та отримаємо наступні вирази для двох ділянок кривої прогинів кранового моста.

Для ділянці $0 \leq x \leq (L - \rho)$

$$f_1 = A \left(\frac{\sin z(L - \rho) \left(\frac{h_2}{\cos zL} - h_1 \right) - B \operatorname{ctg} z(L - \rho) + \frac{F}{zS}}{A \operatorname{ctg} z(L - \rho) - \operatorname{tg} zL \sin z(L - \rho) - \cos z(L - \rho)} + B \right) \left(\frac{\sin zx}{\sin z(L - \rho)} \right) + h_1 (1 - \cos zx) - \frac{Fx\rho}{SL}, \quad (1)$$

Для ділянці $L \geq x \geq (L - \rho)$

$$f_2 = \frac{(\sin z(L - \rho) \left(\frac{h_2}{\cos zL} - h_1 \right) - B \operatorname{ctg} z(L - \rho) + \frac{F}{zS}) (\sin zx - \operatorname{tg} zL \cos zx)}{A \operatorname{ctg} z(L - \rho) - \operatorname{tg} zL \sin z(L - \rho) - \cos z(L - \rho)} + h_2 \left(1 - \frac{\cos zx}{\cos zL} \right) - \frac{F(L - \rho)(L - x)}{SL}, \quad (2)$$

За отриманими виразами були проведені відповідні дослідження деформаційного стану головної балки, геометричні характеристики перерізу якої відповідають двотавру №24М, ДСТ 19425, [9]. Прольот балки $-L=10,5$ м, діючі поперечні навантаження $-0,5$ м; $0,63$ м; $1,0$ м, що відповідають рекомендованим для даного прольоту і номеру профілю двотавра вантажопідйомностям мостових кранів. Результати розрахунків наведені у таблиці 1 у вигляді відносних прогинів $f/[f]$ головної балки для групи режиму роботи 4К, з допустимим значенням відносних прогинів $- [f/L]=2 \cdot 10^{-3}$.

Таблиця 1. – Умовні прогини головної балки

| $\frac{F_i}{S_i}$ | Місце дії F_i , $\rho = L_i$ | Вантажопідйомність F_i, m | | | | | |
|----------------------|--------------------------------------|-----------------------------|----------------|--------------|----------------|-------------|----------------|
| | | $F_1 = 0,5$ | | $F_2 = 0,63$ | | | |
| | | $h_1 = h_2$ | $h_1 \neq h_2$ | $h_1 = h_2$ | $h_1 \neq h_2$ | $h_1 = h_2$ | $h_1 \neq h_2$ |
| $L = 10,5 \text{ м}$ | | | | | | | |
| $\frac{F_i}{1}$ | $0,5L$ | 0,38 | 0,44 | 0,58 | 0,6 | 0,96 | 0,99 |
| | L | -0,12 | -0,06 | -0,12 | -0,06 | -0,12 | -0,06 |
| $\frac{F_i}{1,25}$ | $0,5L$ | 0,36 | 0,41 | 0,55 | 0,58 | 0,92 | 0,96 |
| | L | -0,17 | -0,12 | -0,17 | -0,12 | -0,17 | -0,12 |
| $\frac{F_i}{1,5}$ | $0,5L$ | 0,35 | 0,39 | 0,52 | 0,56 | 0,88 | 0,94 |
| | L | -0,20 | -0,16 | -0,20 | -0,16 | -0,20 | -0,16 |
| $\frac{F_i}{1,75}$ | $0,5L$ | 0,29 | 0,34 | 0,45 | 0,52 | 0,85 | 0,9 |
| | L | -0,25 | -0,18 | -0,25 | -0,18 | -0,25 | -0,18 |
| $\frac{F_i}{2}$ | $0,5L$ | 0,28 | 0,33 | 0,4 | 0,48 | 0,8 | 0,85 |
| | L | -0,3 | -0,23 | -0,3 | -0,23 | -0,3 | -0,23 |

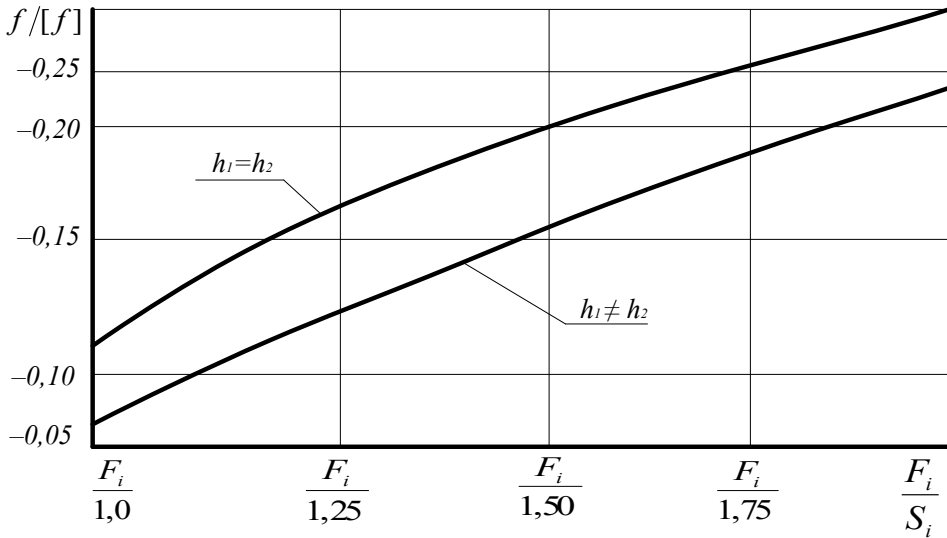


Рис. 3

Аналіз отриманих результатів виявив, що при відношенні діючих на балку сил $F/S \geq 1,5$ використання запропонованого схемного рішення дозволяє до мінімуму зменшити вигини прольотної балки при знаходженні візка з вантажем над опорою. Наприклад, рис. 3 показує, що при розташуванні ексцентрично стискувальних сил S_1, S_2 на різних відстанях ($h_1 \neq h_2$) від нейтральної вісі, вигини балки зменшуються на

(50-70)% у порівнянні з випадком коли ці сили S_1, S_2 діють на одній лінії ($h_1 = h_2$), що дуже позитивно впливає на деформований стан прольотного моста.

На рис. 4 представлені криві прогинів цієї же балки при роботі крана з вантажем у середині прольоту. Де, при відношенні сил $F/S = 2$ наведені наступні прогини: 1.1 ($h_1 = h_2$), 1.2 ($h_1 \neq h_2$) - $F = 0,63 m$, 1.3 ($h_1 = h_2$), 1.4 ($h_1 \neq h_2$) - $F = 1,0 m$; при відношенні $F/S = 1,5$: 2.1 ($h_1 = h_2$), 2.2 ($h_1 \neq h_2$) - $F = 0,63 m$, 2.3 ($h_1 = h_2$), 2.4 ($h_1 \neq h_2$) - $F = 1,0 m$; 3.1, 3.2 – прогини звичайної прольотної балки без розвантажувальних пристроїв, відповідно для $F = 0,63 m$ $F = 1,0 m$.

Аналіз рис. 4 показує, що при розташуванні ексцентрично стискувальних сил S_1, S_2 на різних відстанях ($h_1 \neq h_2$) від нейтральної вісі, прогини балки зростають на (15-25)% у порівнянні з випадком коли $h_1 = h_2$. Але, ці деформації балки не виходять за межі прогинів від тимчасового навантаження F звичайного моста. Це позитивно впливає на деформаційний стан головної балки та полегшує роботу крана в цілому.

Вирази (1), (2) можна використовувати і при виконанні інших задач. Наприклад, при дослідженні пружного стану кранового моста. Для цього достатньо їх двічі диференціювати для отримання рівнянь згинальних моментів

$$M_{z_2,1} = -EI \frac{d^2 f_1}{dx^2}, \quad M_{z_2,2} = -EI \frac{d^2 f_2}{dx^2}.$$

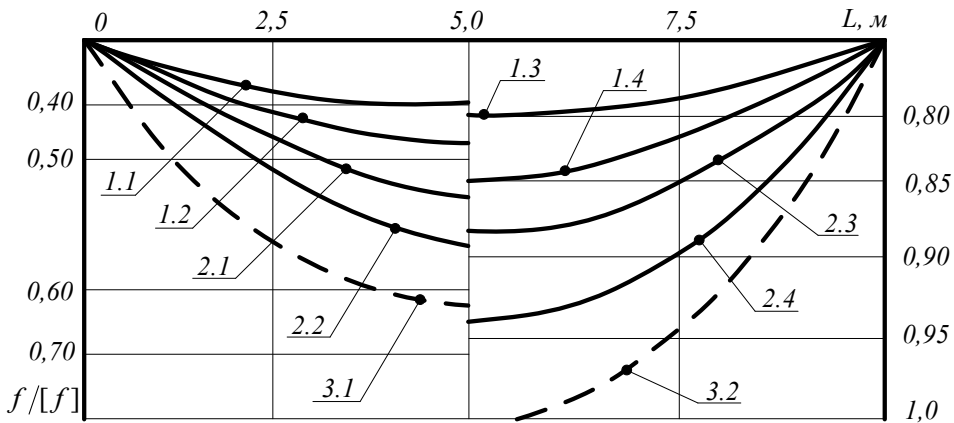


Рис.4

Висновки. Таким чином, було запропоновано та досліджено конструктивне рішення по розвантаженню попередньо напружених кранових мостів. Його використання дозволяє суттєво зменшити

деформації прольотних балок у порівнянні зі звичайними попередньо напруженими мостами та полегшити роботу крана в цілому. Отримані у даній роботі результати можуть бути у подальшому використані для модернізації кранів з метою підвищення їх вантажопідйомності, поширення терміна їх служби без демонтажу, а також для вдосконалення існуючих конструкцій та інженерних методів розрахунку при проектуванні і в умовах реальної експлуатації

Список використаної літератури

1. Беленя Є.І. Металеві конструкції / Є.І. Беленя, Н.Н. Стрелецький, Г.С. Веденіков, Л.В. Клепиков, Т.Н. Морачевський. – М.: Стройиздат, 1991.-687 с.
2. Баженов В.А. Будівельна механіка та металеві конструкції / Баженов В.А., Дащенко О.Ф., Коломієць Л.В., Ухов О.В. – Одеса: Астропринт, 2001. – 432 с.
3. Ухов О.В. Конструктивно-технологические способы разгрузки пролетних строений кранов мостового типа / О.В. Ухов, В.Ф. Семенюк, Б.С. Номерованний, А.В. Ткачов; Одес. гос.политехн.ун-т. – Одесса, 1994. – 16 с. – Деп. в ГНТБ України 20.07.94, №1367-Ук 94.
4. Ткачов А.В. Использование малых кратностей стяжных полиспастов при многоступенчатой разгрузке кранового моста / А.В. Ткачов, О.В. Ухов. Праці Одеського політехнічного університету. 1996. Вип.1. С. 40-43.
5. Чебровский, А. А. Напряженно-деформированное состояние балок, предварительно напряженных изгибом тавра / А. А. Чебровский // Ученые заметки ТОГУ : электронное науч. изд. / Тихоокеанский государственный университет. – Хабаровск, 2013. – Т. 4, № 4. - с. 1593–1601.
6. Ткачов А.В. Уточнений розрахунок жорсткості заздалегідь-напружених балок мостових кранів. / А.В. Ткачов, О.В. Ухов, О.Т. Озернюк. Праці Одеського політехнічного університету. 1997. Вип.1. С. 92-93.
7. Ухов О.В. Підвищення жорсткості кранових балок / О.В. Ухов, А.В. Ткачов, Б.С. Номерованний. Праці Одеського політехнічного університету. 1998. Вип.1 (5). С. 98-101.
8. Тимошенко С.П. Устойчивость упругих систем. – М., ГИТТЛ, 1955. – 567с.
9. Мартовицький Л.М., Глушко В.І. Курсове проектування металоконструкцій: Навч. посібник / Л.М. Мартовицький, В.І. Глушко. – Запоріжжя: Кругозір, 2016.- 418 с.

INFLUENCE NATURE EXTERNAL LOAD INFLUENCE ON THE RIGIDITY OF MAJOR BEAMS

Tkachov A. V., Tkachov O. A.
Odessa National Polytechnic University

Abstract. This paper addresses issues related to the load-bearing capacity of pre-tensioned bridge cranes. The solution is to use a new circuit solution to unload the main beams of the crane and to study their static rigidity at any place of temporary loading. A mathematical model of a bridge crane with prestressed beams is presented, which is based on the general theory of stability of elastic systems. In this paper, we obtained equations of the curve of deflections of this beam, which allowed us to consider and analyze the influence of eccentrically longitudinal forces on its stress-strain state. According to the results of the obtained equations, the study of the static stiffness of the main beam, depending on the nature of the external temporary load.

An analysis of the results revealed that the use of the proposed circuit solution minimizes the curvatures of the overhead structure when finding a trolley with a load above the support. In addition, it was found that when working a bridge crane with cargo in the middle of the span, the deflections of the span structure do not go beyond the regulated deflections of a conventional crane bridge. This has a positive effect on the deformation state of the main beam and facilitates the operation of the crane as a whole.

The results obtained in this work can be further used to upgrade cranes to increase their load capacity, extend their service life without dismantling, as well as to improve existing structures and engineering calculation methods both during their design stages and under actual operating conditions.

Keywords: bridge crane, load carrying capacity, previous stresses, main beams, static stiffness, deformation state.