

## ОРАЗМЕРЯВАНЕ НА РЕБОРДИТЕ НА ХОДОВИТЕ КОЛЕЛА НА МОСТОВ КРАН В УСЛОВИЯ НА СЕИЗМИЧНО ВЪЗДЕЙСТВИЕ

Калин Радлов<sup>1</sup>, Лъчезар Лазов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Университет по архитектура, строителство и геодезия, 1046 София, E-mail: [kradlov@abv.bg](mailto:kradlov@abv.bg)

<sup>2</sup> Технически Университет- София, 1756 София, E-mail: [lcho@mail.bg](mailto:lcho@mail.bg)

**РЕЗЮМЕ.** Настоящата разработка е посветена на разработване на методика за определяне на големината на силата на удар на реборд на ходово колело на мостов кран в глава релса при сеизмично въздействие, на база на която се извършва и оразмеряването на реборда на ходовото колело в условия на сеизмично въздействие. Силата на удар се определя от гледна точка на теорията на удара на база на скоростта на плъзгане на ходовото колело върху релсата. Накрая е показан и конкретен числен пример, който илюстрира и практическото приложение на тази методика.

**Ключови думи:** мостов кран, реборд, сеизмично въздействие, сила на удар

### TRAVELLING WHEELS FLANGE STRENGTH CALCULATIONS OF BRIDGE CRANE IN CASE OF EARTHQUAKE

Kalin Radlov<sup>1</sup>, Lachezar Lazov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> University of architecture, civil engineering and geodesy, 1046 Sofia, E-mail: [kradlov@abv.bg](mailto:kradlov@abv.bg)

<sup>2</sup> Technical University- Sofia, 1756 Sofia, E-mail: [lcho@mail.bg](mailto:lcho@mail.bg)

**ABSTRACT.** The present development is devoted to methodology development for determining the stroke force between bridge crane travelling wheel flange and the rail top in case of earthquake, and on this base, are performed the wheel flange strength calculations in case of earthquake. This force is determined on the base of stroke theory and the travelling wheel sliding velocity on the rail. At the end, on the base of this methodology is given a particular example, which illustrate the application of this methodology.

Key words: bridge crane, flange, seismic action, stroke force

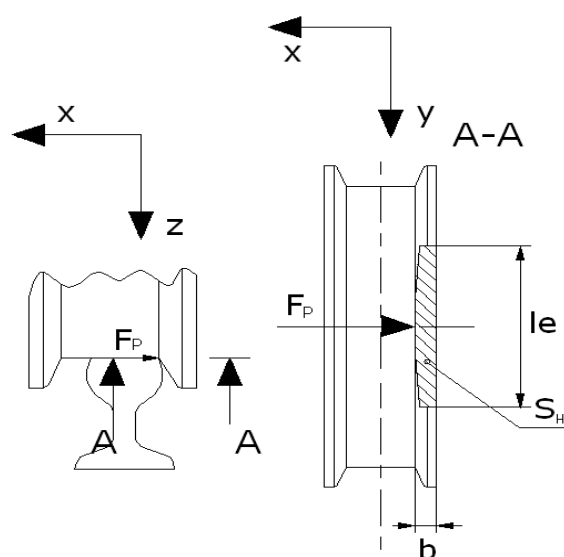
### Въведение

По отношение на ходовите колела на мостов кран и техните реборди, то диаметърът и формата на профила на венца на ходовите колела, на проектираните у нас мостови кранове, в повечето случаи не се подлагат на специална якостна проверка, а са стандартизирани съгласно стандарт БДС 1610-72 и се избират от таблица [1]. Също така е известно обаче, че сеизмичните трептения, се предават от носещата конструкция на сградата към носещата конструкция на мостовия кран през релсата, посредством силите на триене, възникващи между търкалящата повърхнина на ходовото колело и повърхнината на глава релса. Така в резултат на тези сеизмични трептения е напълно възможно в условия на сеизмично въздействие да се получи плъзгане, при което да се стигне до челен удар на реборда на ходовото колело в главата на релсата на подкрановия път със сила  $F_p$  [kN] (фиг.1).

Тогава якостната проверка и оразмеряването по тангенциални напрежения на срязване в реборда, в резултат от тази сила на удар  $F_p$  [kN], се извършват съгласно уравнение (1)

$$\tau_p = \frac{F_p}{S_H} \leq [\tau] \quad (1)$$

където  $[\tau]$  е допустимата стойност на тангенциалните напрежения;



Фиг.1. Схема на удар на реборд на ходово колело в глава релса

$S_H$  — лицето на сечението от реборда поемащо натоварването (фиг.1), кето се изчислява съгласно уравнение (2)

$$S_H = b * l_e \quad (2)$$

където  $l_e$  е линеен параметър на ходовото колело на крана (фиг.1);

$b$  — дебелината на реборда на ходовото колело на крана (фиг.1).

Целта на настоящата разработка е да се разработи методика за определяне на големината на силата на удар на реборд на ходово колело в глава релса, на база на която да се извърши и оразмеряването на реборда на ходовото колело в условия на сеизмично въздействие.

### Изчисляване на силата на удар

Разглеждаме удара на реборд на ходово колело в глава релса, като прав удар на две тела. Тогава големината на ударния импулс изчисляваме по формула (3) [2].

$$S = (1 + k) \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \cdot (v_1 - v_2) \quad (3)$$

където  $(v_1 - v_2)$  е разликата между скоростта на движение на релсата и скоростта на движение на ходовото колело на крана. В случая тази разлика представлява скоростта на плъзгане на ходово колело върху релса  $\dot{x}_r(t)$ . Тъй като в случая търсим най-неблагоприятното натоварване по отношение на реборда на ходово колело, се взема само максималната стойност на скоростта на плъзгане  $\dot{x}_{r,MAX}$ ;

$k$  — коефициент на възстановяване;

$m_1$  — частта от масата на строителната конструкция, която се отчита при удара;

$m_2$  — частта от масата на мостовия кран, която се отчита при удара;

Доказано е, че между ударния импулс и силата на удар е в сила зависимостта (4) [2]

$$S = \int_{t_x}^{t_x + \tau} F \cdot dt \quad (4)$$

където  $\tau$  е продължителността на удара.

Доказано е, че при прав удар на две твърди тела съществува фаза на сближаване и фаза на раздалчаване на контактните повърхнини на двете тела през времето на продължителност на удара  $\tau$ , като силата на удар е най-

голяма между двете фази, но точен алгоритъм за определяне, както на продължителността на двете отделни фази, така и на максималната стойност на силата на удар все още няма.

За целите на настоящите изследвания се взема средната приблизителна стойност на силата на удар, която с достатъчна степен на точност може да бъде изчислена по формула (5) [2].

$$S = F * \tau \quad (5)$$

Доказано е че  $\tau = (10^{-3} \div 10^{-6}) \text{ sec}$  [2]

Така силата, която се реализира в реборда на ходово колело при удар, може да се изчисли по формула (6).

$$F_{P,MAX} = (1 + k) \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \cdot \frac{\dot{x}_{r,MAX}}{\tau} \quad (6)$$

### Избор на динамичен модел

Избора на динамичен модел, за определянето на големината на скоростта на плъзгане и силата на удар на реборда на ходово колело в глава релса при сеизмично въздействие е въпрос, който крие в себе си известна неопределеност. Това е така защото действителното разстояние между главата на крановата релса и ребордите на ходовите колела на крана в момента на настъпване на сеизмичното въздействие, на практика е случайна величина, която може да варира в границите от 0 до  $(S - r)/2$ , където  $r$  е широчината на главата на релсата, а  $S$  е междуребордното разстояние на едно ходово колело. Поради тази причина настоящите изследвания се извършват при следните опростяващи предпоставки:

- с цел изследване на най- неблагоприятния сценарий се приема, че удар на реборда на ходово колело в глава релса настъпва в този момент от време, в който имаме максимална скорост на плъзгане на ходовото колело върху релсата;

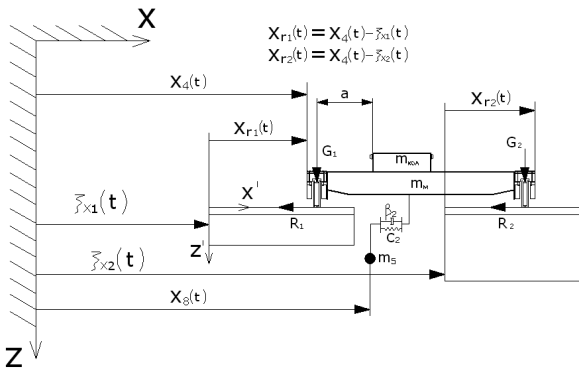
- при определянето на тази максимална скорост на плъзгане се премахват ребордите на ходовите колела и връзката между ходови колела и релса се разглежда като свободна плъзгаща връзка;

- поради малкият ъгъл на разлюляване на товароподемното въже на крана при сеизмично въздействие, то се моделира като хоризонтална еластична връзка;

- коравината на „опън- натиск“ на моста на крана се счита за достатъчно голяма, за да се пренебрегне в случая еластичната реакция на „опън- натиск“ на моста на крана при сеизмичното въздействие по посока напречно на крановия път.

- плъзгането на крановата количка върху моста на крана се пренебрегва;

На база на горните опростяващи предпоставки, по отношение на динамичното поведение на моста на крана по направление напречно на подкрановия път се получава динамичния модел представен на фиг.2



Фиг.2.Динамичен модел на мостов кран по посока напречно на подкрановия път

На фиг.2 са използвани следните означения:

$\zeta_{x1}(t), \zeta_{x2}(t)$  — движения на двете подкранови греди спрямо абсолютно неподвижна координатна система XYZ ;

$x_4(t)$  — движение на крана спрямо абсолютно неподвижната координатна система XYZ;

$x_8(t)$  — движение на товара спрямо абсолютно неподвижната координатна система XYZ;

$x_{r1}(t)$  — относително движение (плъзгане) на крана спрямо лява релса- фиг.2;

$x_{r2}(t)$  — относително движение (плъзгане) на крана спрямо дясна релса- фиг.2;

$G_1$  — сила на тежестта, която се предава от моста на крана към носещата конструкция на сградата откъм страната на лява релса- фиг.2; Изчислява се по формула (7)

$$G_1 = g \cdot \left( m_{гл.гр} + m_{ч.гр} + \frac{(L-a)}{L} \cdot (m_{кол} + m_5) \right) \quad (7)$$

където  $m_5$  е масата на товара;

$m_{гл.гр}$  — маса на главна греда;

$m_{ч.гр}$  — маса на челна греда;

$a$  — разстоянието от крановата количка до левия край на моста на крана;

$L$  — отвор на крана.

$R_1$  — силата на триене с която си взаимодействат носещата конструкция на сградата и мостовия кран откъм страната на лявата релса- фиг.2;

$G_2$  — теглото, което се предава от моста на крана към носещата конструкция на сградата откъм страната на дясната релса; Изчислява се аналогично на  $G_1$  и формула (7);

$R_2$  — силата на триене с която си взаимодействат носещата конструкция на сградата и мостовия кран откъм страната на дясната релса- фиг.2;

Функционалната зависимост между двете релативни премествания се изразява с (8)

$$x_{r2}(t) = x_{r1}(t) + \zeta_{x1}(t) - \zeta_{x2}(t) \quad (8)$$

Диференциалните уравнения на движение на системата (фиг.2) се извеждат от принципа на Даламбер. Така за лявата челна греда на крана, където е фиксирана релативната координатна система  $X'Y'Z'$  (фиг.2) може да се запише уравнение (9)

$$m_{кр} \cdot \ddot{x}_{r1} = \vec{F} - m_{кр} \cdot \ddot{\zeta}_{x1} \quad (9)$$

където  $m_{кр}$  е масата на мостов кран без товар;

$\ddot{x}_{r1}$  — релативното ускорение;

$\ddot{\zeta}_{x1}$  — преносното ускорение;

$\vec{F}$  — външната сила, която действа върху крана откъм разглежданата лява челна греда. Тя се изразява със зависимостта (10).

$$\vec{F} = \vec{R}_1 + \vec{R}_2 + \vec{F}_{el} + \vec{F}_D \quad (10)$$

където  $\vec{F}_D$  е дисипативната сила, породена от коефициента на линейно съпротивление на въжено- полиспаснатата система в хоризонтално направление

$$\vec{F}_D = -\beta_2(\dot{x}_4 - \dot{x}_8)$$

$\vec{F}_{el}$  — еластичната сила, породена от еластичността на въжено- полиспаснатата система в хоризонтално направление

$$\vec{F}_{el} = -c_2(x_4 - x_8)$$

Сили  $R_1$  и  $R_2$  се изчисляват като сили на сухо (Кулоново) триене по формули (11) [3]

$$\begin{aligned}\bar{R}_1 &= -\mu \cdot g \left( m_{зл.зр} + m_{ч.зр} + \frac{(L-a)}{L} \cdot (m_{кол} + m_5) \right) \cdot \text{sign}|\dot{x}_{r1}| \\ \bar{R}_2 &= -\mu \cdot g \left( m_{зл.зр} + m_{ч.зр} + \frac{a}{L} \cdot (m_{кол} + m_5) \right) \cdot \\ &\cdot \text{sign}|\dot{x}_{r1}(t) + \dot{\zeta}_{X1}(t) - \dot{\zeta}_{X2}(t)|\end{aligned}\quad (11)$$

Където  $\mu$  е коефициент на триене между ходово колело и релса, който за кранове работещи на закрито може да се приеме  $\mu = 0,2$  [4].

Така замествайки уравнения (11) и изразите за дисипативната и еластичната сила в уравнение (10), и след това замествайки получения резултат в уравнение (9), се получава диференциално уравнение на относително движение на лявата челна гредна на мостов кран (12)

$$\begin{aligned}m_{кр} \cdot \ddot{x}_{r1} &= -c_2(x_{r1} + \zeta_{X1} - x_8) - \\ &- \beta_2(\dot{x}_{r1} + \dot{\zeta}_{X1} - \dot{x}_8) - m_{кр} \cdot \ddot{\zeta}_{X1} - \\ &- \mu \cdot g \cdot \left( m_{зл.зр} + m_{ч.зр} + \frac{(L-a)}{L} \cdot (m_{кол} + m_5) \right) \cdot \text{sign}|\dot{x}_{r1}| - \\ &- \mu \cdot g \cdot \left( m_{зл.зр} + m_{ч.зр} + \frac{a}{L} \cdot (m_{кол} + m_5) \right) \cdot \\ &\cdot \text{sign}|\dot{x}_{r1}(t) + \dot{\zeta}_{X1}(t) - \dot{\zeta}_{X2}(t)|\end{aligned}\quad (12)$$

Второто диференциално уравнение за движение на товара -  $m_5$ , извеждаме пак на база на принципа на Даламбер (13)

$$\begin{aligned}(\dot{x}_{r1} + \dot{\zeta}_{X1}) \cdot \beta_2 + (x_{r1} + \zeta_{X1}) \cdot c_2 - \\ - \ddot{x}_8 \cdot m_5 - \dot{x}_8 \cdot \beta_2 - x_8 \cdot c_2 = 0\end{aligned}\quad (13)$$

Тъй като най-неблагоприятния случай на натоварване по отношение на ребордите на ходовите колела при сеизмично въздействие напречно на подкрановия път, е установен като случай на кран без товар [5], то второто диференциално уравнение на системата (13) отпада и системата се разглежда като система с една степен на свобода с диференциално уравнение (14)

$$\begin{aligned}m_{кр} \ddot{x}_{r1} &= -m_{кр} \ddot{\zeta}_{X1} - A \cdot \text{sign}|\dot{x}_{r1}| - \\ &- B \cdot \text{sign}|\dot{x}_{r1}(t) + \dot{\zeta}_{X1}(t) - \dot{\zeta}_{X2}(t)|\end{aligned}\quad (14)$$

Където е направено следното полагане:

$$\begin{aligned}\mu \cdot g \cdot \left( m_{зл.зр} + m_{ч.зр} + \frac{(L-a)}{L} \cdot (m_{кол} + m_5) \right) &= A \\ \mu \cdot g \cdot \left( m_{зл.зр} + m_{ч.зр} + \frac{a}{L} \cdot (m_{кол} + m_5) \right) &= B\end{aligned}$$

Диференциалното уравнение за определяне на скоростта на плъзгане (14), се решава чрез специално разработен алгоритъм в средата на софтуерния продукт MATLAB [6].

## Числен пример

Зададени изходни данни:

Маса на моста на крана:  $m_M = 53,6$  [t];

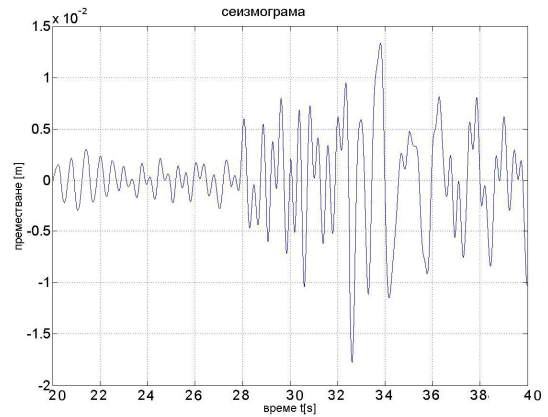
Маса на крановата количка:  $m_{кол} = 9,5$  [t];

Отвор на крана:  $L = 27$  [m];

Товароподемност:  $m_5 = 20$  [t];

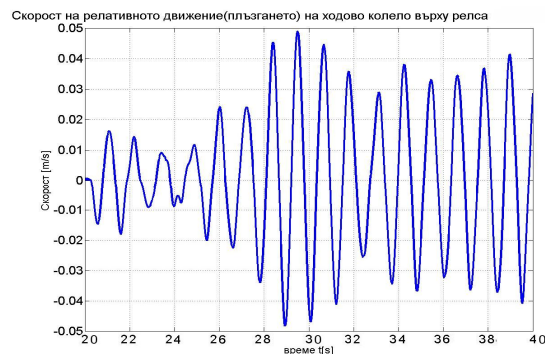
Коефициент на триене:  $\mu = 0,2$ ;

Сеизмограмата, която е зададена като входно сеизмично въздействие е показана на фиг.3:



Фиг.3. Входна сеизмограма

След заместване на зададените стойности в разработен алгоритъм в средата на софтуерния продукт MATLAB, са получени следните резултати по отношение на плъзгането на ходовите колела на мостов кран върху релсата- фиг.4



Фиг.4. Скорост на плъзгане на ходово колело върху релса в напречна посока

От фиг.4. се вижда, че максималната стойност на релативната скорост (скоростта на плъзгането) на ходово колело върху релса е 0,0495 m/s. Най-неблагоприятната сила на удар между ходово колело и релса, която може да се получи, се изчислява по формула (6), като се приемат следните стойности на отделните параметри от формула (6) за целите на конкретните изчисления:

-приема се най-неблагоприятната стойност по отношение на продължителността на удара:  $\tau = 10^{-6}[\text{sec}]$ ;

-при удар на две стоманени тела отчитаме коефициент на възтановяване:  $k = \frac{5}{9} [2]$ ;

-масата  $m_2$  се явява равна на масата на мостовия кран без товар:  $m_2 = m_{KP} = 6,31[t]$

-масата  $m_1$  в случая се приема за равна на:  
 $m_1 = 1,0[t]$

Така замествайки конкретните стойности във формула (6) за силата на удар в ребордите се получава стойност  $F_p = 76900[kN]$

Съгласно уравнение (1), необходимото напречно сечение на реборда на ходовото колело (фиг.1) на мостовия кран, при оразмеряването на сеизмични въздействия трябва да се извърши съгласно (15)

$$S_H \geq \frac{F_p}{[\tau]}; \quad S_H \geq \frac{76900 * 10^3}{[\tau]} [m^2] \quad (15)$$

Препоръчана за публикуване от  
Редакционен съвет

## Изводи

Разработена е методика за определяне на големината на силата на удар на реборд на ходово колело на мостов кран в глава релса при сеизмично въздействие, на база на която се извършва и оразмеряването на реборда на ходовото колело в условия на сеизмично въздействие. Силата на удар се определя от гледна точка на теорията на удара на база на скоростта на плъзгане на ходовото колело върху релсата. Показан е и конкретен числен пример, който илюстрира и практическото приложение на тази методика.

## Литература

1. Коларов И., Проданов М., Караиванов П., Проектиране на подземно- транспортни машини, издателство "Техника" София 1987г.
2. Писарев А., Парасков Ц., Бъчваров С., Курс по теоретична механика II част- динамика, издателство "ТЕХНИКА", София 1988г.
3. de Silva Clarence W., "VIBRATION: fundamentals and practice", ISBN 0-8493- 1808-4, pp. 957. CRC Press Boca-Raton-London-New York-Washington D.C., USA 2000
4. Коларов И. Метални конструкции на подземно-транспортни и строителни машини. Техника, София, 1987г.
5. Радлов К., „Сеизмична квалификация на носещата конструкция на мостов кран“, Автореферат на дисертация за получаване на к.т.н., ТУ – София 2010г.
6. Тончев Й., MATLAB- Преобразувания, Изчисления, Визуализация- Част 2, Издателство "Техника", София 2006г.
7. Кърцелин Е.Р., Комплексен математичен модел на руднична подземна уредба, Год. МГУ "Св.Ив.Рилски", т. 527, св.III, 2009, стр. 73–82