

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства та
природокористування
Навчально-науковий механічний інститут
Кафедра будівельних, дорожніх, меліоративних,
сільськогосподарських машин і обладнання

02-01-523М

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання практичних робіт
«Проектування і розрахунок на міцність металевих
конструкцій землерийно-транспортних машин рамного
типу» з навчальної дисципліни
«Проектування металоконструкцій машин»
для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського)
рівня за освітньо-професійною програмою
«Створення та експлуатації машин і обладнання»
денної і заочної форм навчання

Рекомендовано науково-
методичною
радою з якості ННМІ
Протокол № 1
від 07.09.2022 року

Рівне – 2022

Методичні вказівки до виконання практичних робіт «Проектування і розрахунок на міцність металевих конструкцій землерийно-транспортних машин рамного типу» з навчальної дисципліни «Проектування металоконструкцій машин» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійною програмою «Створення та експлуатації машин і обладнання» спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» денної та заочної форм навчання [Електронне видання] / Нечидюк А. А. – Рівне : НУВГП, 2022. – 18 с.

Укладач: Нечидюк А. А., к.т.н., доцент кафедри будівельних, дорожніх, меліоративних, сільськогосподарських машин і обладнання.

Відповідальна за випуск: Налобіна О. О., д.т.н., професор, в.о. завідувача кафедри будівельних, дорожніх, меліоративних, сільськогосподарських машин і обладнання.

Керівник групи забезпечення спеціальності: Нечидюк А. А., к.т.н., доцент кафедри будівельних, дорожніх, меліоративних, сільськогосподарських машин і обладнання.

© А. А. Нечидюк, 2022
© Національний університет
водного господарства та
природокористування, 2022

Проектування і розрахунок на міцність металевих конструкцій землерийно-транспортних машин рамного типу

Розрахунок штовхальної рами бульдозера

Завдання. Спроекувати і розрахувати на міцність штовхальну раму гусеничного бульдозера із неповоротним відвалом у першому розрахунковому положенні.

Таблиця варіантів

Варіанти	Тягове зусилля T_{max} , кН	Тип базової машина	Ґрунт
1	40	гусеничний трактор	суглинок
2	60		суглинок
3	100		суглинок
4	140		суглинок
5	160		суглинок
6	180		суглинок
7	200		суглинок
8	230		суглинок
9	250		суглинок
10	270		суглинок
11	60		глина
12	100		глина
13	140		глина
14	160		глина
15	180		глина

Послідовність розрахунку

1. Визначити масу бульдозера.
2. Визначити параметри відвала.
3. Визначити зусилля і реакції, що діють на штовхальну раму.
4. Розрахувати на міцність штовхальні бруси.

Розглянемо, як розрахувати на міцність штовхальну раму гусеничного бульдозера із неповоротним відвалом, якщо сила тяги бульдозера $T_{max} = 150$ кН.

На відвал бульдозера діють сили, що передаються на штовхальну раму (рис. 1): сила опору F , яка розкладається на горизонтальну F_x і вертикальну F_y складові, зусилля в гідроциліндрах F_u . Штовхальна рама бульдозера може бути з неповоротним і поворотним відвалом. Штовхальна рама бульдозера (рис. 2) складається з відвала 1 і штовхальник брусів 2 і 3. До штовхальних брусів відвал жорстко закріплюється за допомогою підкосів 6 і 7 та розкосів 4 і 5.

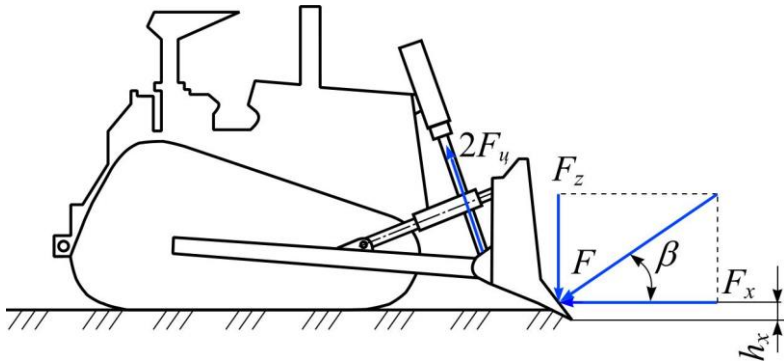


Рис. 1. Сили, які діють на відвал бульдозера

Визначення маси бульдозера

Сила тяги бульдозера не може перевищувати силу зчеплення:

$$T_{max} \leq \varphi \cdot G_{зч}, \quad (1)$$

де $\varphi = 0,9$ – коефіцієнт зчеплення для гусеничного трактора; $G_{зч}$ – сила зчеплення, яка для гусеничного трактора дорівнює силі ваги машини.

Тоді сила зчеплення:

$$G_{зч} = \frac{T_{max}}{\varphi} = \frac{150}{0,9} = 166,7 \text{ кН}.$$

Маса бульдозера:

$$m_b = \frac{G_{зч}}{g} = \frac{166,7}{9,8} = 17 \text{ т}, \quad (2)$$

де $g=9,8 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння.

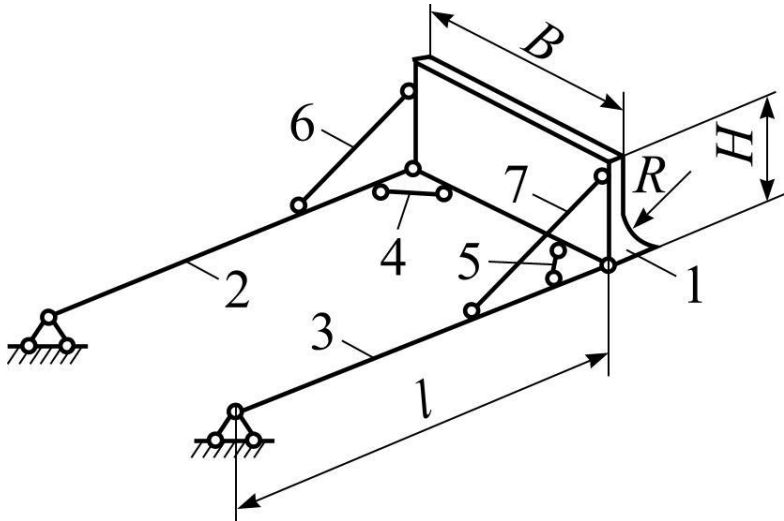


Рис. 2. Штовхальна рама бульдозера

Визначення параметрів відвала

Довжина відвала пов'язана з масою бульдозера таким співвідношенням:

$$B = (1,2 \dots 1,4) \cdot \sqrt[3]{m_6} = 1,3 \cdot \sqrt[3]{17} = 3,3 \text{ м.} \quad (3)$$

Довжина відвала має бути більшою від ширини трактора.

Висоту відвала H і радіус заокруглення R обчислюють із співвідношень:

$$H = (0,4 \dots 0,45) \cdot \sqrt[3]{m_6} = 0,45 \cdot \sqrt[3]{17} = 1,16 \text{ м,} \quad (4)$$

$$R = (0,8 \dots 0,9) H = 0,85 \cdot 1,16 = 0,9 \text{ м.} \quad (5)$$

Довжина штовхальних брусів визначається з компоувальної схеми бульдозера.

Визначення зусиль і реакцій, що діють на штовхальну раму бульдозера.

Розрахунки проводимо для першого розрахункового положення, коли бульдозер рухається на горизонтальній ділянці і впирається в перешкоду середньою точкою відвала, а гідроциліндри підйому відвала перебувають у замкненому стані. У середній точці відвала діятиме сила опору F (рис. 3, а), яка розкладається на дві складові F_x і F_z .

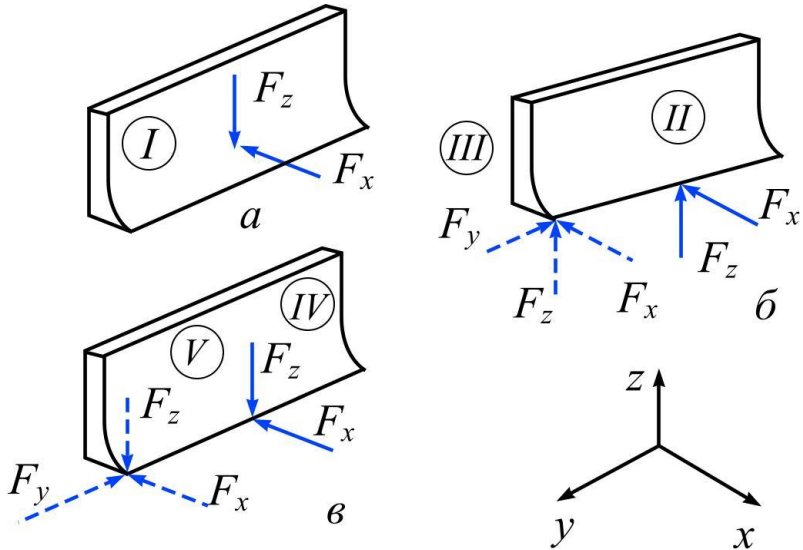


Рис.3. Розрахункові положення штовхальної рами бульдозера

Найбільше значення горизонтальної складової обмежується силою зчеплення, тобто

$$F_x = \varphi \cdot G_{3ч} = 0,9 \cdot 166,7 = 150 \text{ кН}.$$

Вертикальна складова сили опору

$$F_z = F_x \cdot \text{tg}\beta = 150 \cdot \text{tg}17^\circ = 150 \cdot \text{tg}17^\circ = 46 \text{ кН}, \quad (6)$$

де $\beta = 17^\circ$ ($15^\circ \dots 21^\circ$) – кут нахилу рівнодійної для розрахункового ґрунту.

Рівнодійна сил опору прикладається в точці на відстані $h_e = 0,27 \cdot H$, м; $h_e = 0,27 \cdot 1,16 = 0,31$ м при транспортуванні призми волочіння.

Схему сил, що діють на штовхальну раму бульдозера, зображено на рис. 4.

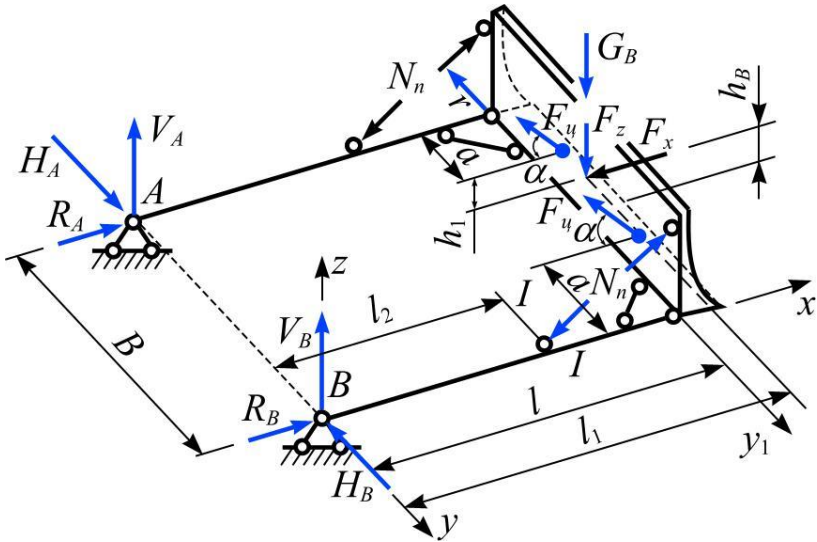


Рис. 4. Схема сил, що діють на штовхальну раму бульдозера

Для визначення зусиль у гідроциліндрах підйому відвала записують рівняння моментів відносно осі y :

$$\sum M_y = -(F_z + G_B) \cdot l_1 + F_x h_B + 2F_{\perp} \cdot \sin \alpha \cdot l + 2F_{\perp} \cdot \cos \alpha \cdot h_1 = 0, \quad (7)$$

звідки

$$F_{\perp} = \frac{(F_z + G_B)l_1 - F_x h_B}{2 \cdot (l \cdot \sin \alpha + h_1 \cos \alpha)} = \frac{(46 + 23,3) \cdot 5,4 - 150 \cdot 0,31}{2 \cdot (5 \cdot \sin 60^\circ + 0,63 \cdot \cos 60^\circ)} = 35,3 \text{ кН}$$

де $l = 5,0$ м; $l_1 = 5,4$ м; $l_2 = 3,1$ м; $h_1 = 0,63$ м; $a = 0,6$ м; $\alpha = 60^\circ$ – розміри і кут призначають із компоновальної схеми бульдозера; $G_B = 9,81(0,13...0,16)m_6 = 9,81 \cdot 0,14 \cdot 17 = 23,3$ кН – сила ваги відвала.

У шарових шарнірах A і B діють по три реакції. Внаслідок симетрії рами і навантаження на опорах A і B будуть симетричні опорні реакції $R_A = R_B$; $V_A = V_B$; $H_A = H_B$.

Вертикальні реакції обчислюють із рівняння рівноваги штовхальної рами.

$$\begin{aligned} \sum M_x = -V_A \cdot B + (F_Z + G_B) \frac{B}{2} - F_{\perp} \sin \alpha \cdot a - \\ - F_{\perp} \sin \alpha \cdot (B - a) = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

звідси

$$\begin{aligned} V_A = \frac{(F_Z + G_B) \frac{B}{2} - F_{\perp} \sin \alpha \cdot B}{B} = \\ = \frac{(46 + 23,3) \frac{3,3}{2} - 35,3 \cdot \sin 60^\circ \cdot 3,3}{3,3} = 4,08 \text{ кН} \end{aligned}$$

Для визначення горизонтальної реакції складають рівняння моментів відносно осі z .

$$\begin{aligned} \sum M_z = F_x \frac{B}{2} + F_{\perp} \cos \alpha \cdot a + \\ + F_{\perp} \cos \alpha \cdot (B - a) - R_A \cdot B = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

звідки

$$\begin{aligned} R_A = \frac{F_x \frac{B}{2} + F_{\perp} \cos \alpha \cdot B}{B} = \\ = \frac{150 \cdot \frac{3,3}{2} + 35,3 \cdot \cos 60^\circ \cdot 3,3}{3,3} = 92,7 \text{ кН} \end{aligned}$$

Реакції $H_A = H_B$ не можна визначити з рівнянь рівноваги, тому що рама один раз статично

невизначувана. Застосовуємо метод сил, а рівняння записують так:

$$\delta_{11} X_1 + \Delta_{1F} = 0, \text{ звідки } X_1 = H_A = -\frac{\Delta_{1F}}{\delta_{11}}. \quad (10)$$

Схему штовхальної рами з горизонтальним навантаженням наведено на рис. 5, а. Тут для спрощення розрахунків слід прийняти, що горизонтальні сили діють у площині рами. Вантажну і одиничну епюри згинальних моментів зображено на рис. 5, б, в.

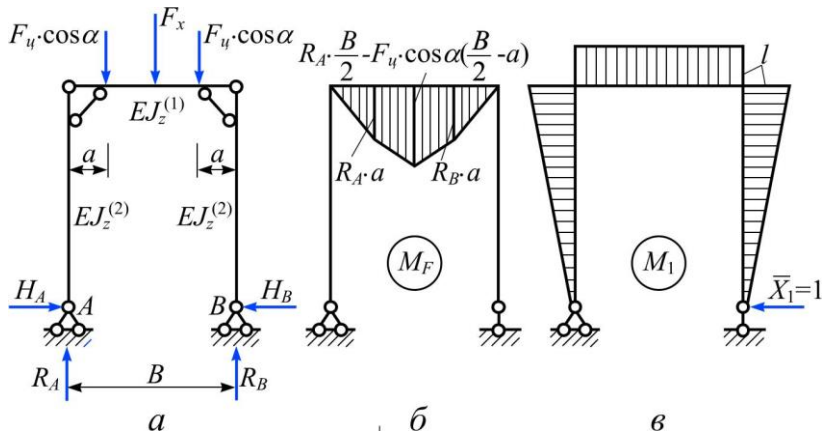


Рис. 5. Схема штовхальної рами бульдозера з горизонтальним навантаженням:

- а – схема сил; б – вантажна епюра згинальних моментів;
- в – одинична епюра згинальних моментів

Коефіцієнти переміщення визначаємо за формулою Максвелла-Мора. Для цього можна застосувати способи Верещагіна або Сімпсона-Корноухова. Використаємо спосіб Верещагіна:

$$\delta_{11} = \sum_1^n \int_0^l \frac{M_1^2 dx}{EI_z} = 2 \frac{1}{EI_z^{(2)}} \frac{1}{2} 5,0^2 \cdot \frac{2}{3} 5,0 +$$

$$+ \frac{1}{EI_z^{(1)}} 3,3 \cdot 5,0 \cdot 5,0 = \frac{83,3}{EI_z^{(2)}} + \frac{82,5}{EI_z^{(1)}} = \frac{84,9}{EI_z^{(2)}}$$

$$\Delta_{1F} = \sum_1^n \int_0^l \frac{M_1 M_F dx}{EI_z} =$$

$$= -2 \frac{1}{EI_z^{(1)}} \left(\frac{1}{2} 0,6 \cdot 55,62 \cdot 5 + \frac{55,62 + 134,4}{2} 1,05 \cdot 5 \right) =$$

$$= -\frac{1164,5}{EI_z^{(1)}} = -\frac{23,29}{EI_z^{(2)}}$$

де $EI_z^{(1)}$ – жорсткість поперечного перерізу відвала;
 $EI_z^{(2)}$ – жорсткість поперечного перерізу штовхального
бруса. У розрахунках $EI_z^{(1)} = EI_z^{(2)} \cdot 50$.

Згинальні моменти на епюрі M_F (див. рис. 5, б) відповідно становлять: посередині відвала $M_F = 134,4$ кН·м, а на відстані $a = 0,6$ м – $M_F = 55,62$ кН·м. Тоді значення горизонтальної реакції

$$X_1 = H_A = \frac{23,29}{84,9} = 0,27 \text{ кН}.$$

Розрахунок на міцність штовхальних брусів

Штовхальні бруси зазнають стискання і згинання в двох площинах. Нормальні напруження обчислюють за формулою

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_x}{W_x} + \frac{M_z}{W_z}. \quad (11)$$

На початку проектування, коли розміри перерізу невідомі, їх оцінюють таким чином. Поперечний

переріз штовхального бруса зазвичай має коробчастий переріз рис. 6.

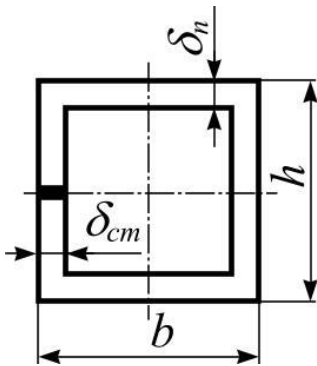


Рис. 6. Поперечний переріз штовхального бруса

У практиці машинобудування співвідношення δ_n/b та δ_{cm}/h приймається рівним (0,025...0,04).
(12)

Якщо прийняти переріз квадратним, тобто $b = h$, та $K_1 = 2 \cdot \delta_n/b = K_2 = 2 \cdot \delta_{cm}/h$, то $\delta_n = \delta_{cm}$, $K_1 = K_2 = K$.

Тоді геометричні характеристики (A – площа поперечного перерізу, m^2 ; W_x, W_z – моменти опору поперечного перерізу штовхального бруса відносно осей x і z , m^3) квадратного коробчастого перерізу можна визначити за формулами:

$$A = b^2 [1 - (1 - K)^2]; \quad (13)$$

$$W_x = W_z = \frac{b^3 [1 - (1 - K)^4]}{6}. \quad (14)$$

Підставляючи вирази (13, 14) у (11) та виконуючи перетворення, отримаємо рівняння:

$$b^3 [\sigma] \cdot [1 - (1 - K)^4] - bN [1 - (1 - K)^2] - 6(M_y + M_z) = 0 \quad (15)$$

Для розв'язку даного неповного кубічного рівняння відносно “ b ” застосуємо формулу Кардано. Позначимо:

$$P = -\frac{N}{[\sigma] \cdot [1 - (1 - K)^2]};$$

$$q = \frac{6(M_z + M_y)}{[\sigma] \cdot [1 - (1 - K)^4]}.$$
(16)

Отримаємо:

$$Q = \left(\frac{P}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2; \quad A = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}};$$

$$B = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}.$$
(17)

Тоді корінь рівняння: $b = A + B$. (18)

При цьому необхідно відмітити, що рівняння має один дійсний корінь, якщо $Q > 0$.

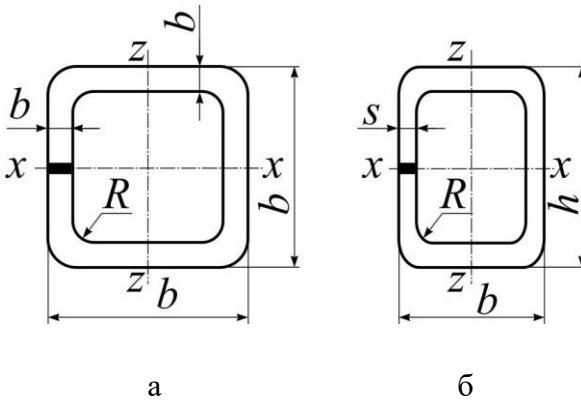


Рис. 7. Поперечні перерізи профілів сталевих гнутих замкнених зварних: а – квадратний; б – прямокутний

Визначимо за формулою $\delta_{cm} = \delta_n = Kb/2$ товщини стінок та полицок штовхального бруса, їх необхідно привести до стандартної товщини прокатних листів.

Після остаточного визначення поперечних розмірів, переріз необхідно перевірити за формулою (11).

Виготовлення штовхальних брусів можливе також з гнутих зварних профілів квадратного та прямокутного перерізів (рис. 7). Сортамент таких профілів приведений в табл. 1.

Визначення розмірів гнутого профілю виконується методом ітерацій.

Приймаємо $K=2 \cdot 0,04=0,08$ (формула (12)). Штовхальну раму виготовляємо із сталі 65, для якої допустимі напруження $[\sigma] = 270$ МПа.

Визначаємо товщину стінки штовхального бруса з рівняння (15).

$$\begin{aligned} P &= - \frac{N}{[\sigma] \cdot [1 - (1 - K)^2]} = \\ &= - \frac{92,7 \cdot 10^{-3}}{270 \cdot [1 - (1 - 0,08)^2]} = 2,24 \cdot 10^{-3}; \\ q &= \frac{6(M_z + M_y)}{[\sigma] \cdot [1 - (1 - K)^4]} = \\ &= \frac{6(12,65 \cdot 10^{-3} + 0,84 \cdot 10^{-3})}{270 \cdot [1 - (1 - 0,08)^4]} = 1,06 \cdot 10^{-3}. \end{aligned}$$

Тоді

$$Q = \left(\frac{P}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2 = \left(\frac{2,24 \cdot 10^{-3}}{3}\right)^3 +$$

$$+ \left(\frac{1,06 \cdot 10^{-3}}{2}\right)^2 = 2,8 \cdot 10^{-7} ;$$

$$A = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} =$$

$$= \sqrt[3]{-\frac{1,06 \cdot 10^{-3}}{2} + \sqrt{2,8 \cdot 10^{-7}}} = 9,47 \cdot 10^{-3} ;$$

$$B = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}} =$$

$$= \sqrt[3]{-\frac{1,06 \cdot 10^{-3}}{2} - \sqrt{2,8 \cdot 10^{-7}}} = 0,102$$

Отже $b=h=A+B=0,102+9,47 \cdot 10^{-3}=0,11$ м;
 $\delta_{ст} = K \cdot b/2 = 0,08 \cdot 0,11/2 = 4,4 \cdot 10^{-3}$ м, приймаємо $b = 0,14$ м,
 $\delta_{ст}(\delta_{п}) = 0,005$ м.

Таблиця 1

Характеристика деяких профілів сталених гнутих замкнених зварних квадратних і прямокутних коробчастого перерізу

Форма перерізу	h , мм	b , мм	S , мм	A , см ²	J_x , см ⁴	W_x , см ³	J_z , см ⁴	W_z , см ³	Маса 1 м, кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Квадрат	100	100	5	17,8	256	51,1	-	-	13,9
	140	140	5	25,8	780	109	-	-	20,2
	140	140	8	38,7	1055	151	-	-	30,4
	150	150	8	41,9	1330	177	-	-	32,9
Прямокутник	150	100	8	34,4	960	128	514	103	27,0
	160	130	7	36,1	1263	158	921	142	28,3
	230	100	5	29,9	1868	162	525	105	23,5
	230	100	8	46,5	2804	243	770	154	36,6

Умовні позначення: A – площа поперечного перерізу; J_x , J_z – моменти інерції перерізу відносно осей відповідно x і y .

Перевіряємо нормальні напруження за формулою (11).

Визначаємо геометричні характеристики поперечного перерізу штовхального бруса, який виготовлений у вигляді порожнистого квадрата (рис. 6) з розмірами $b = h = 14$ см, $\delta_{cm}(\delta_n) = 0,5$ см.

Площа поперечного перерізу:

$$A = b^2 - (b - 2 \cdot \delta_{cm})^2 = 14^2 - (14 - 2 \cdot 0,5)^2 = 27 \text{ см}^2$$

Моменти опору поперечного перерізу штовхального бруса:

$$\begin{aligned} W_x = W_z &= \frac{b^4 - (b - 2\delta_{cm})^4}{6 \cdot b} = \\ &= \frac{14^4 - (14 - 2 \cdot 0,5)^4}{6 \cdot 14} = 117,3 \text{ см}^3 \end{aligned}$$

Внутрішні силові фактори в перерізі I-I штовхального бруса (рис. 4):

$$N_{I-I} = -R_B = -92,7 \text{ кН}.$$

Згинальні моменти:

$$M_x = V_B \cdot l_2 = 4,08 \cdot 3,1 = 12,65 \text{ кНм};$$

$$M_z = H_B \cdot l_2 = 0,27 \cdot 3,1 = 0,84 \text{ кНм}.$$

Тоді нормальні напруження:

$$\begin{aligned} \sigma_{max} &= -\frac{92,7 \cdot 10^3}{27 \cdot 10^{-4}} - \frac{12,65 \cdot 10^3}{117,3 \cdot 10^{-6}} - \frac{0,84 \cdot 10^3}{117,3 \cdot 10^{-6}} = \\ &= -135 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = -135 \text{ МПа} \end{aligned}$$

З урахуванням динамічної дії сил напруження

$$\sigma_D = k_D \cdot \sigma_{max} = 1,5 \cdot 135 = 202,5 \text{ МПа}.$$

Допустимі напруження для сталі 65 –
[σ]=270 МПа.

Умова міцності виконується.

Література.

1. Машины для земляних робіт : навч. посіб. / Л. А. Хмара, С. В. Кравець, В. В. Нічке та ін. ; під заг. ред. проф. Л. А. Хмари та проф. С. В. Кравця. Рівне; Дніпропетровськ; Харків, 2010. 575 с.

2. Будівельна механіка металевих конструкцій дорожньо-будівельних, підйомних і транспортних машин : підручник / за ред. В. Г. Піскунова, В. Д. Шевченка. К. : Вища школа, 2004. 438 с.