

## ЖОРСТКІСТНІ ПАРАМЕТРИ ПІДЙОМНИХ КАНАТІВ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ОСЬОВОГО НАТЯГУ

© V. Ropay, I. Fedorova

### RIGID CHARACTERISTICS OF LIFTING ROPES DEPENDING ON AXIAL TENSION

Наведено основні співвідношення та розраховані значення агрегатних коефіцієнтів жорсткості канатів двох конструкцій ГОСТ 7669–80 та ГОСТ 7668-80 при натягу у діапазоні від 0 до 0,75 від розривних зусиль каната.

Приведены основные зависимости и вычисленные значения агрегатных коэффициентов жесткости канатов двух конструкций ГОСТ 7669–80 и ГОСТ 7668-80 при натяжениях в диапазоне от 0 до 0,75 от разрывных усилий каната.

Для не натягнутого дротового канату, драти якого можуть мати відносні зміщення коли канат зігнутий, згинальна жорсткість  $G_0$  визначається сумою жорсткостей сгибу всіх його дротів. Однак, експериментально встановлено, що згинальна жорсткість натягнутого канату суттєво зростає (до  $(50-100) \cdot G_0$  із збільшенням його осьового натягу до 0,75 від розривної спроможності) [1-3]. В роботі зробимо оцінку впливу зміни осьового натягу (згинальної жорсткості канату) на чисельні значення агрегатних коефіцієнтів жорсткості прямолінійного багатошарового канату, як природньо закрученого стрижня.

Для багатошарового каната, що має  $N$  шарів сталок, при сумісній їх роботі приймається гіпотеза плоских перерізів. Дійсно, шари сталок складаються щільно один на другий на канатопрядільній машині і канат може наражатися будь-яким навантаженням при експлуатації. Навантаження і граничні умови закріплення каната впливають на його деформації тільки при певних навантаженнях може змінитись щільний контакт між шарами сталок. До того як станеться цей момент канат слід розглядати як агрегат, коефіцієнти жорсткості якого повинні визначатись сумами [4]:

$$A = \sum_{i=1}^N A_i; \quad B = \sum_{i=1}^N B_i; \quad C = \sum_{i=1}^N C_i, \quad (1)$$

де  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$  – агрегатні коефіцієнти жорсткості  $i$ -го шару сталок, що залежать від числа дротів в  $i$ -му шарі  $m_i$ , агрегатних коефіцієнтів жорсткості сталок  $a_{0i}$ ,  $b_{0i}$ ,  $c_{0i}$ ,  $g_{0i}$  і параметрів сплетіння сталок – радіуса  $R_i$  і кута сплетіння  $\beta_i$  (рис.1).

$$A_i = m_i \left( a_{0i} \cos^3 \beta_i + 2 \frac{c_{0i}}{R_i} \sin^3 \beta_i \cos^2 \beta_i + \frac{b_{0i} \sin^2 \beta_i + g_{0i} \cos^2 \beta_i}{R_i^2} \sin^4 \beta_i \cos \beta_i \right); \quad (2)$$

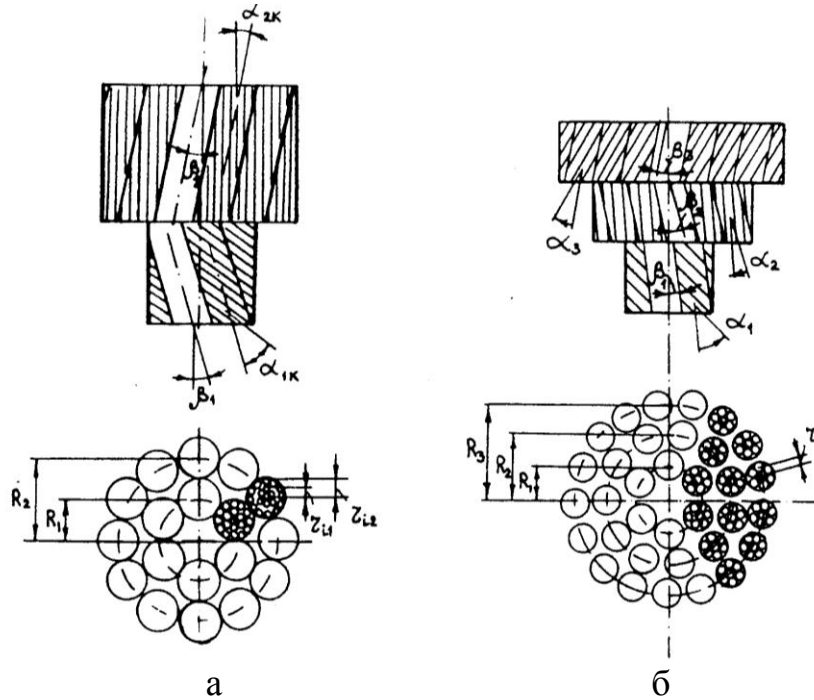


Рис. 1. Позначення параметрів сплетіння багатошарових канатів:  
а – для двошарового каната; б – для трьохшарового каната

$$B_i = m_i(a_{0i}R_i^2 \sin^2 \beta_i \cos \beta_i + b_{0i} \cos^7 \beta_i + g_{0i}(1 - \cos^2 \beta_i) \sin^2 \beta_i \cos \beta_i + 2c_{0i}R_i \cos^4 \beta_i \sin \beta_i); \quad (3)$$

$$C_i = m_i(a_{0i}R_i \cos^2 \beta_i \sin \beta_i + c_{0i}(1 + \operatorname{tg}^4 \beta_i) \cos^5 \beta_i + \frac{1}{R_i}(b_{0i} \cos^2 \beta_i - g_{0i}(1 + \cos^2 \beta_i)) \sin^3 \beta_i \cos^2 \beta_i). \quad (4)$$

Агрегатні коефіцієнти жорсткості сталки  $i$ -го шару залежать від матеріалу дротів, їх діаметра, параметрів сплетіння кожного  $k$ -го ряду – радіуса  $r_{ik}$  и кута сплетіння  $\alpha_{ik}$ , числа дротів в кожному ряді  $n_{ik}$ , числа рядів дротів в пряді  $l$  і визначаються наступними формулами :

$$a_{0i} = a_{ci} + \sum_{k=1}^{l_i} n_{ik} a_{ik}; \quad (5)$$

$$b_{0i} = b_{ci} + \sum_{k=1}^{l_i} n_{ik} b_{ik}; \quad (6)$$

$$c_{0i} = \sum_{k=1}^{l_i} n_{ik} c_{ik}; \quad (7)$$

$$g_{0i} = E \left( I_{ci} + \sum_{k=1}^{l_i} n_{ik} I_{ik} \right) K^*, \quad (8)$$

де  $E$  – модуль пружності при розтягуванні матеріалу дротів,  $I_{ci}$ ,  $I_{ck}$  – моменти інерції площі поперечного перерізу центральної ( $c$ ) і дротів  $k$ -го ряду  $i$ -го шару,  $K^* > 1$  – коефіцієнт, що враховує збільшення згинальної жорсткості каната

при натягу,  $a_{ci}$ ,  $b_{ci}$  – жорсткості центральних дротів  $i$ -го волокна при розтягу і крученні

$$a_{ci} = EF_{ci}; b_{ci} = GI_{\rho ci}, \quad (9)$$

де  $F_{ci}$ ,  $I_{\rho ci}$  – відповідно, площа і полярний момент інерції площі поперечного перерізу центрального дроту,  $G$  – модуль пружності при зсуві матеріалу дроту.

Для дротів  $k$ -го ряду  $i$ -го волокна параметри жорсткості залежать від їх жорсткості і параметрів сплетіння і визначаються наступними твердженнями :

$$a_{ik} = EF_{ik} \cos^3 \alpha_{ik} + EI_{ik} \frac{\sin^4 \alpha_{ik}}{r_{ik}^2} \cos^3 \alpha_{ik} + GI_{\rho ik} \frac{\sin^6 \alpha_{ik} \cos^2 \alpha_{ik}}{r_{ik}^2}; \quad (10)$$

$$b_{ik} = EF_{ik} r_{ik}^2 \cos \alpha_{ik} \sin^2 \alpha_{ik} + GI_{\rho ik} \cos^2 \alpha_{ik} + EI_{ik} (1 + \cos^2 \alpha_{ik})^2 \sin^2 \alpha_{ik} \cos \alpha_{ik}; \quad (11)$$

$$c_{ik} = EF_{ik} r_{ik} \cos^2 \alpha_{ik} \sin \alpha_{ik} + GI_{\rho ik} \frac{\cos^4 \alpha_{ik}}{r_{ik}} \sin^3 \alpha_{ik} - \\ - EI_{ik} (1 + \cos^2 \alpha_{ik}) \frac{\cos^2 \alpha_{ik}}{r_{ik}} \sin^3 \alpha_{ik}, \quad (12)$$

де  $r_{ik}$ ,  $\alpha_{ik}$  – радіус і кут плетіння дротів  $k$ -го ряду;

$F_{ik}$ ,  $I_{ik}$ ,  $I_{\rho ik}$  – відповідно площа поперечного перерізу, осьовий і полярний моменти інерції площі поперечного перерізу дроту  $k$ -го ряду.

Діаметри дротів канату позначимо  $\delta_{ci}$ ,  $\delta_{ik}$  – відповідно для центрального дроту і дроту  $k$ -го ряду  $i$ -го плетіння, тоді

$$F_{ik} = \frac{\pi \delta_{ik}^2}{4}; \quad I_{ik} = \frac{\pi \delta_{ik}^4}{64}; \quad I_{\rho ik} = \frac{\pi \delta_{ik}^4}{32}. \quad (13)$$

Кут сплетіння зовнішнього шару сталок  $\beta_i$  будемо вважати додатнім. Дивлячись на напрям сплетіння встановимо знаки кутів сплетіння залишкових шарів і дротів в сталках  $\alpha_{ik}$ . Ці ж знаки кутів повинні зберегтися при розрахунку пружно-деформованого стану канату [4].

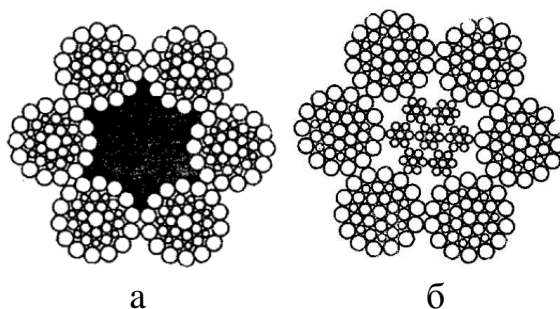


Рис. 2. Поперечні перерізи канатів  
а – ГОСТ 7668–80 , б – ГОСТ 69–80

Згідно з теорією подібності і розмірностей для розрахунку агрегатних коефіцієнтів жорсткості на інші розміри канату однакової конструкції можливо скористатись наступними формулами:

$$\frac{A_1}{A_2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2; \quad \frac{B_1}{B_2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^4; \quad \frac{C_1}{C_2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^3. \quad (14)$$

Приведемо чисельні значення геометричних і жорсткосних параметрів канатів двох конструкцій, що використовуються в сьогоденні в якості підйомних на Донбасі (ГОСТ 7668-80 і ТУ 14-4-1444-87) і в Кривбасі – (ГОСТ 7669-80), поперечні перерізи яких показані на рис. 2. Використовуються канати хрестового сплетіння ( $\beta +$ ,  $\alpha -$ ), але нами був розглянутий додатково чисельний приклад розрахунку параметрів канатів одностороннього сплетіння – ( $\beta +$ ,  $\alpha +$ ).

Таблиця 1

Агрегатні коефіцієнти жорсткості каната  $d=42$  мм (ГОСТ 7668-80) однобічного та хрестового сплетіння при різному натягу

$K^*$	$A \cdot 10^8$ , Н	$B$ , Нм <sup>2</sup>	$C$ , Нм	$G_k$ , Нм <sup>2</sup>	$\Delta \cdot 10^9$ , Нм <sup>2</sup>
Канат однобічного сплетіння					
1	1,14987	3516	628921	40,005	8,816
2	1,14989	3530	628779	80,01	10,497
4	1,14992	3556	628494	160,02	13,858
6	1,14995	3582	628209	240,03	17,219
8	1,14998	3608	627925	320,05	20,580
10	1,15001	3634	627641	400,05	23,941
20	1,15017	3764	626217	800,11	40,746
30	1,15032	3894	624794	1200,17	57,551
40	1,15048	4024	623370	1600,23	74,356
50	1,15063	4154	621948	200,28	91,161
100	1,15141	4805	614831	4000,6	175,19
Канат хрестового сплетіння					
1	1,13925	1511	404213	40,005	8,736
2	1,13926	1524	404070	80,01	10,335
4	1,13929	1550	403790	160,02	13,534

6	1,13932	1576	403500	240,03	16,734
8	1,13936	1602	403220	320,05	19,933
10	1,13939	1628	402930	4000,05	23,132
20	1,13954	1758	401510	800,11	39,128
30	1,13969	1888	400090	1200,17	55,124
40	1,13985	2018	398660	1600,23	71,120
50	1,14001	2148	397240	2000,28	87,116
100	1,14079	2799	390120	4000,56	167,095

Для каната ГОСТ 7668-80  $d=42$  мм,  $\mu=6,75$  кг/м,  $\Sigma F_i=683,6$  мм<sup>2</sup>, який має наступні параметри сталок конструкції 1+7+7/7+14 які сплетені з дротів діаметром  $\delta_0=2,6$  мм,  $\delta_1=1,9$  мм,  $\delta_2=1,9$  мм,  $\delta_3=1,4$  мм,  $\delta_4=2,3$  мм з кроком  $h=126$  мм, що відповідає кратності скрутки дротів в сталці  $k_n=9$  (ГОСТ 3241-91), радіуси скрутки дротів:  $r_1=2,25$  мм,  $r_2=3,65$  мм,  $r_3=3,9$  мм,  $r_4=5,85$  мм, кути скрутки дротів  $\alpha_1=\pm 6,4018^\circ$ ,  $\alpha_2=\pm 10,3257^\circ$ ,  $\alpha_3=\pm 11,0055^\circ$ ,  $\alpha_4=\pm 16,2630^\circ$ , знак (+) для каната однобічній и (-) – для каната крестової скрутки. Діаметр сталки  $d_{np}=14$  мм. Радіус та кут скрутки сталки:  $R=14$  мм,  $\beta=17,8597^\circ$ .

Таблица 2

Агрегатні коефіцієнти жорсткості каната хрестового сплетіння

$d = 42$  мм (ГОСТ 7669-80) при різному натягу

$K^*$	$A \cdot 10^8$ , Н	$B$ , Нм <sup>2</sup>	$C$ , Нм	$G_k$ , Нм <sup>2</sup>
1	1,387761	2231,932	451127,0	50,44857
10	1,388037	2391,595	449917,5	504,4857
20	1,388344	2568,999	448573,7	1008,971
30	1,388650	2743,345	447716,1	1513,457
40	1,388959	2923,807	445886,1	2017,943
50	1,389266	3001,201	444542,3	2522,429

Агрегатні коефіцієнти жорсткості сталки:  $a_0=2,212207 \cdot 10^7$  Н,  $b_0=40,42835$  Нм<sup>2</sup>,  $c_0=\pm 23715,34$  Нм (знак + для каната однобічної скрутки),  $g_0=6,667605$  Нм<sup>2</sup>.

Агрегатні коефіцієнти жорсткості не натягнутого каната однобічної скрутки:  $A=1,15167 \cdot 10^8$  Н,  $B=3763,752$  Нм<sup>2</sup>,  $C=626217,3$  Нм,  $G=800,1126$  Нм<sup>2</sup>,  $\Delta=4,07461 \cdot 10^{10}$  Н<sup>2</sup>м<sup>2</sup>,  $B_k=354,2627$  Нм<sup>2</sup>,  $k=5,44457 \cdot 10^{-3}$  м.

Агрегатні коефіцієнти жорсткості не натягнутого каната крестової скрутки:  $A=1,139542 \cdot 10^8 \text{ Н}$ ,  $B=1758,051 \text{ Нм}^2$ ,  $C=401509 \text{ Нм}$ ,  $G=800,1126 \text{ Нм}^2$ ,  $\Delta=3,912288 \cdot 10^{10} \text{ Н}^2 \text{ м}^2$ ,  $B_k=343,3549 \text{ Нм}^2$ ,  $k=3,52342 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

Канат ГОСТ 7669-80 має осердя, яке виконано з двох шарів сталок конструкції 1+6. Були розраховані жорсткісні параметри усіх дротів, сталок і каната в цілому з урахуванням модулів пружності сталі і параметрів скрутки. Розглянуті значення агрегатних коефіцієнтів жорсткості канатів можуть бути використані для більш точного розрахунку пружно-деформованого стану підйомних канатів при навішуванні та в період експлуатації, коли вони підлягають різному осьовому натягу.

#### Перелік посилань

1. Ропай В.А. Экспериментальное определение изгибной жесткости троса в зависимости от осевого натяжения / В.А. Ропай, И.В. Бельмас // Изв. вузов. Горный журнал. – 1988. – №12. – С. 75–76.
2. Самарский А.Ф. Зависимость жесткости стальных канатов при изгибе от осевой растягивающей нагрузки / А.Ф. Самарский, В.М. Приходько // Стальные канаты. – К.: Техніка. – 1967. – Вып. 4. – С. 127–129.
3. Малиновский В.А. Особенности механики подъемных и тяговых стальных канатов с учетом нелинейных и квазиупругих свойств / В.А. Малиновский. – Дисс... докт. наук: 05.05.06. – Д. 1996. – 425 с.
4. Глушко М.Ф. Стальные подъемные канаты. / М.Ф. Глушко // – К.: Техніка. – 1966. – 327 с.

#### ABSTRACT

**Purpose.** Is set by scientific research, that with the increase of depth of mine ( increase lenth and tension of steelropes) their flexural inflexibility is substantially increased. The purpose of this article is calculate of aggregate coefficients of rigidity of rope as a naturally torsional rod under different tension.

**Originality** It is first set the substantial (to 100 times) changing of rigid parameters of ropes on tension in diapason from zero to 0.75 of break down that is real for the mine lifting setting in deep mines. This fact requires the changing of methods of solving of problems of statics and dynamics of mine ropes

**Method.** It is used analitical method.of calculation.

**Results.** Method of calculation and the base dependencies. As examples are written tables of calculated coefficients of rigidity of wire ropes of two designs.

**Practical significance.** A method will allow to do the specified calculations of the tensly- deformed state of wire ropes and their longevity for deep mines.

**Keywords:** *aggregate coefficients of rigidity of rope, tension, base dependencies, examples of calculations*