

α

УДК 622.673:[531.391+539.4]

В.І. Самуся, д-р техн. наук, Д.Л. Колосов, канд. техн. наук

(Україна, Дніпропетровськ, Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет»)

**НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН КАНАТА З БЕЗМЕЖНОЮ КІЛЬКІСТЮ
ТРОСІВ ПРИ НАВАНТАЖЕННІ РОЗПОДІЛЕНИМ ДОТИЧНИМ ЗУСИЛЯМ**

Вступ. Розширення області застосування гумотросових канатів на промислових підприємствах вимагає розв'язання цілого комплексу наукових завдань з розробки наукових основ та принципів створення нових, більш довговічних і надійних ліфтovих установок з гумотросовими канатами. У зв'язку з цим розробка високотехнологічного ліftового обладнання нового покоління з гумотросовими канатами є актуальною проблемою прикладного дослідження.

Ліфт – підйомна машина і його експлуатація має бути безпечною. Найвідповідальнішою складовою такої машини є сталеві троси. В гумотросових канатах троси завулканізовані в гумову оболонку, яка захищає їх від впливу зовнішнього середовища та взаємодії з елементами конструкції машини. Порушення гумової оболонки позбавляє її захисних властивостей, а троси каната необхідного захисту. Відповідно, встановлення умов руйнування оболонки дозволить врахувати умови експлуатації канатів та забезпечити безпеку їх використання в якості тягових канатів ліфтів, а в перспективі і в якості головних канатів шахтних підйомних машин.

Гумотросові канати дозволяють використовувати троси малих діаметрів, відповідно підйомні машини можуть мати барабани зменшених габаритів. Зменшенні габарити приводних барабанів дозволяють застосовувати більш економічні приводи ліфтів.

Стан питання та постановка задачі дослідження. Питання взаємодії плоского тягового органу з барабаном розглядалося в роботах [1, 2]. У вказаних роботах не досліджувався вплив конструкції каната на розподіл напружень в його гумовій оболонці на ділянці взаємодії з барабаном. Визначення впливу конструкції гумотросового каната на коефіцієнт концентрації напружень в ньому при взаємодії з барабаном підйомної машини – **актуальна науково-технічна задача**. Її розв'язання дозволить обґрунтовано підбирати гумотросовий канат для ліфтів нового покоління з гумотросовими канатами. Розв'язання цієї задачі безпосередньо пов'язано з експериментальним визначенням міцності зв'язку гуми з тросом [3].

Поміж канатом та барабаном, в загальному випадку, діють сили тертя та тиску. Тиск по довжині каната можна вважати рівномірно розподіленим. По ширині каната (барабана) сили тиску розподілені циклічно з кроком, який дорівнює кроку розташування тросів. Сили натягнення тросів в канаті, завдяки їх взаємному зв'язку гумовою оболонкою, розподілені практично рівномірно [4]. Така особливість дозволяє розглядати не весь канат, а його частину.

Разом з тим відомо і те, що при локальному навантаженні зразків значної ширини таких, як гумотросові канати, характер деформування в середній частині зразка буде відрізнятися від характеру деформування крайньої. Дослідити характер деформування каната заданої ширини (із заданою кількістю тросів) складно. Таку задачу можна спростити, розглянувши канат з одного троса та канат з безмежною кількістю тросів. Перший випадок дозволить встановити напружене-деформований стан, який притаманний крайньому тросу. Другий – тросу, розташованому на значній відстані від краю. В роботі [5] виконано дослідження напружене-деформованого стану каната, що має один трос та до нього прикладене розподілене дотичне зусилля. Другий випадок розглянуто в даній роботі.

Основний зміст роботи. Схема експериментального навантаження каната з безмежною кількістю тросів зсувними розподіленими силами показана на рисунку 1.

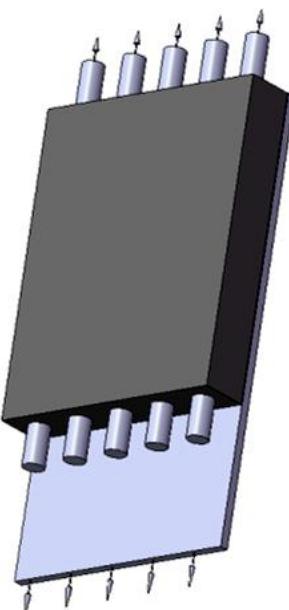


Рис. 1. Схема експериментального навантаження каната зсувними розподіленими силами

Вище зазначено, що сили натягнення тросів в канаті, завдяки їх взаємному зв'язку гумовою оболонкою, розподілені практично рівномірно. Така особливість дозволяє розглядати не весь канат з безмежною кількістю тросів, а його частину (рис. 2).

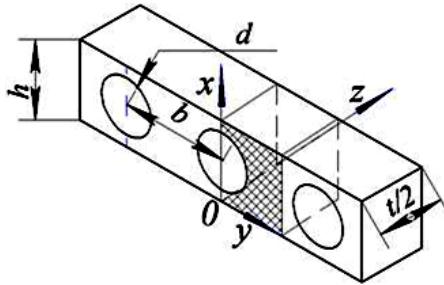


Рис. 2. Схема розташування тросів в перерізі каната

Виділимо з наведеного зразка систематично повторюваний елемент, показаний штриховою на рисунку. Побудувати розв'язок для елементу такої складної форми та забезпечити його систематичну повторюваність достатньо складно. Спростимо задачу, знехтувавши наявністю тросів та розглянувши зразок призматичної форми розмірами $h \times \frac{b}{2} \times t$. Як і в роботі [5] будемо вважати, що зразок виконано з матеріалу оболонки каната – гуми.

Будемо вважати, що канат з барабаном взаємодіє по поверхні $x = h$. По цій поверхні переміщення каната відносно барабана не повинно бути

$$u_y = u_x = u_z = 0. \quad (1)$$

На поверхню $x = 0$ не діють зовнішні сили, тому

$$X_x = 0, \quad X_z = X_y = 0. \quad (2)$$

Границі умови для поверхні $y = 0$ та $y = \frac{b}{2}$

$$u_y = 0, \quad X_y = Z_y = 0. \quad (3)$$

По поверхням $z = \pm t/2$ не повинні діяти дотичні напруження, тому мають виконуватися умови

$$X_z = Z_y = 0. \quad (4)$$

До того мають бути реалізовані умови рівності переміщень усіх точок, що відповідають місцю розташування троса та відсутності тиску на гуму, розташованої поміж тросами

$$\begin{cases} y^2 + \left(x - \frac{h}{2}\right)^2 \leq \left(\frac{d}{2}\right)^2, & u_x = \delta; \\ y^2 + \left(x - \frac{h}{2}\right)^2 > \left(\frac{d}{2}\right)^2, & Z_z = 0, \end{cases} \quad (5)$$

де δ – величина зсуву частини перерізу гумового зразку, що відповідає місцю розташування троса в гумовій оболонці каната.

В наведених граничних умовах переміщення позначені літерою u , напрямок переміщення індексом, що відповідає осі координат. Дотичні напруження позначені Z_x та Z_y . Нормальне напруження позначені двома однаковими літерами, що збігаються з відповідним напрямом, наприклад Z_z .

Останні граничні умови змішані. Замість них приймемо умову для $z = \pm t/2$

$$Z_{z=t/2} = \begin{cases} 1, & \text{коли } y^2 + \left(x - \frac{h}{2}\right)^2 \leq \left(\frac{d}{2}\right)^2; \\ 0, & \text{коли } y^2 + \left(x - \frac{h}{2}\right)^2 > \left(\frac{d}{2}\right)^2. \end{cases} \quad (6)$$

Розкладемо залежність в подвійний ряд Фур'є

$$f(n,m) = \frac{8 \int_0^{hb/2} \int_0^0 Z_{z=t/2} \cos(x N_n) \cos(y M_m)}{b h}. \quad (7)$$

Шуканий розподіл дотичних напружень будемо мати в перерізі $z=0$.

Для розв'язання задачі застосуємо одну бігармонічну функцію φ . В цьому випадку переміщення та напруження визначаються залежностями

$$\begin{aligned} 2Gu_x &= -\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial z}, \quad 2Gu_y = -\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y \partial z}, \quad 2Gu_z = \left[2(1-\mu)\Delta^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] \varphi, \\ X_x &= \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \Delta^2 - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right] \varphi, \quad X_y = -\frac{\partial^3 \varphi}{\partial x \partial y \partial z}, \\ Y_y &= \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \Delta^2 - \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right] \varphi, \quad Y_z = \frac{\partial}{\partial y} \left[(1-\mu)\Delta^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] \varphi, \\ Z_z &= \frac{\partial}{\partial z} \left[(2-\mu)\Delta^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] \varphi, \quad Z_x = \frac{\partial}{\partial x} \left[(1-\mu)\Delta^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] \varphi, \end{aligned} \quad (8)$$

де $\Delta^2(\dots) = \frac{\partial^2(\dots)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\dots)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(\dots)}{\partial z^2}$.

Приймемо бігармонічну функцію наступного вигляду

$$\varphi = A \left[ch(Cz) + Dz sh(Cz) \right] \cos(Nx) \cos(My), \quad (9)$$

де A, D, N, M – довільні сталі; $C^2 = N^2 + M^2$.

З урахуванням граничних умов, приймемо бігармонічну функцію (функцію Ері) для розглянутої схеми навантаження каната в наступній формі

$$\varphi = \sum_{n=1}^K \sum_{m=1}^K A_{n,m} \left[ch(C_{n,m}z) + D_{n,m}z sh(C_{n,m}z) \right] \cos(N_n x) \cos(M_m y), \quad (10)$$

де $N_n = \frac{(n+1/2)\pi}{h}$; $M_m = \frac{2\pi m}{b}$; $C_{n,m}^2 = N_n^2 + M_m^2$; $D_{n,m} = -\frac{1}{\frac{2\mu}{C_{n,m}} + z th(C_{n,m}z)}$.

Значення сталої $D_{n,m}$ знайдено з умови відсутності дотичних напружень по границям зразку $z = \pm \frac{t}{2}$. Значення сталої $A_{n,m}$ знайдемо з умови забезпечення характеру деформування поверхні зразка при $z = \pm \frac{t}{2}$, заданого функцією $f(n,m)$

$$A_{n,m} = \frac{f(n,m)}{\left[sh\left(C_{n,m} \frac{t}{2}\right) C_{n,m} + D_{n,m} \left(sh\left(C_{n,m} \frac{t}{2}\right) (2\mu-1) + \frac{t}{2} ch\left(C_{n,m} \frac{t}{2}\right) \right) \right] C_{n,m}}.$$

Дотичні напруження в площині, дотичній до поверхні троса з боку нерухомого приєднання гумового зразка в перерізі $x = h - \frac{h-d}{2}$ визначимо за залежністю

$$Z_x = \sum_{n=0}^K \sum_{m=0}^K A_{n,m} \left[ch(C_{n,m}z) + D_{n,m} \left(2 \frac{ch(C_{n,m}z)}{C_{n,m}} \mu + z \ sh(C_{n,m}z) \right) \right] C_{n,m}^2 \times \\ \times \sin(N_n x) \cos(M_m y) n. \quad (11)$$

Графіки розподілу заданих нормальних напружень на поверхні зразка та дотичних напруженень в площині, дотичній до тросів для випадку зміщення троса каната з безмежною кількістю тросів, наведено на рисунку 3. З графіків видно, що задані розподілені сили тиску загалом відповідають потрібним граничним умовам, а дотичні напруження змінюються по ширині зразка та відрізняються від нуля лише напроти троса. Максимальних значень вони набувають при мінімальній відстані від поверхні троса до поверхні гумової оболонки, до якої прикладене дотичне навантаження. Разом з тим, характер розподілу напруженень залежить і від геометричних параметрів каната. При розрахунках міцності деталей машин конструктори користуються коефіцієнтом концентрації напружень, який дорівнює відношенню максимальних напруженень до середніх. На рисунку 4 для каната з тросом одиничного діаметру показана залежність коефіцієнта концентрації напружень від параметрів каната для зразка висотою, рівною діаметру троса.

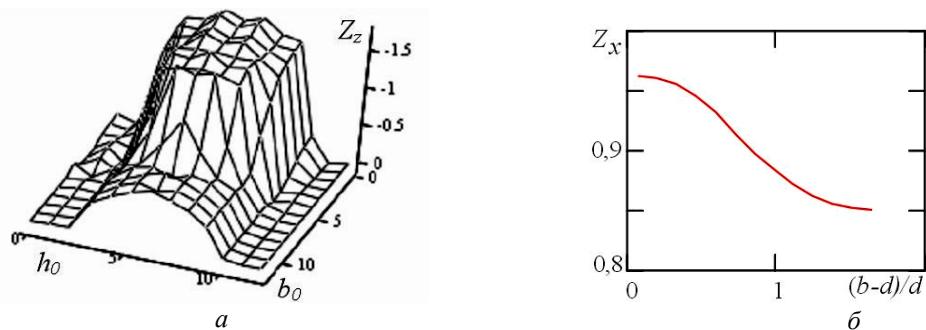


Рис. 3. Графіки розподілу заданих нормальних напружень Z_z на поверхні зразка (а) та дотичних напружень Z_x вздовж осі y (б) у відносних координатах

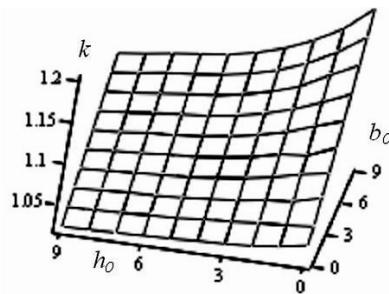


Рис. 4. Залежність коефіцієнта концентрації напружень k від параметрів каната h_0 та b_0

Параметри h_0 та b_0 визначаються за залежностями $h_0 = 10 \left(\frac{h-1,1d}{d} \right)$ та $b_0 = 10 \left(\frac{b-1,1d}{d} \right)$. Отриманий

графік дозволяє встановлювати значення коефіцієнта концентрації напружень k від параметрів каната h_0 та b_0 , відповідно, узагальнити експериментально встановлені значення міцності зразків [3].

Порівнявши результати досліджень з наведеними в роботі [5] графічними залежностями, можна зробити висновок, що в зразку каната з одним тросом напруження розподілені менш рівномірно, коефіцієнти концентрації в ньому більші. Випадок такої схеми навантаження більш небезпечний. В умовах, близьких до умов деформування каната з одним тросом працюють крайні троси канатів з будь-якою, але кінцевою кількістю тросів. Для будь-якої конструкції каната наявність крайнього тросу природна. Відповідно, для експериментальних досліджень треба обирати схему зразка, що відповідає канату з одним тросом.

Висновки. Напружений стан окремого троса в однотросовому канаті більш небезпечний, ніж тросів безмежно широкого каната, навантаженого розподіленим дотичним зусиллям. В канаті обмеженої ширини крайні троси працюють в умовах більш близьких до умов навантаження тросу однотросового каната. Тому експерименти мають передбачати випробовування і таких канатів. Знайдені теоретичні результати

Гірнича електромеханіка

дозволяють використовувати стандартні випробовування для каната на умови його взаємодії з приводним та веденим барабанами та обирати схеми випробовувань каната.

Отримана залежність коефіцієнта концентрації напружень від параметрів каната дозволяє врахувати розподіл напружень в гумі при проектуванні підйомно-транспортних машин з гумотросовим тяговим органом, чим підвищити безпеку експлуатації таких машин.

Список літератури

1. Білоус О.І. Напруженій стан гумової оболонки стрічки на барабані конвеєра подачі шихти в доменну піч / О.І. Білоус, Д.Л. Колосов // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – № 4(262). – С. 113-114.
2. Бельмас I.В. Врахування дотичних напружень при автоматичному конструкуванні ступінчастого канату / I.В. Бельмас, Д.Л. Колосов, I.T. Бобильова // Стальные канаты: Сб. научн. трудов. – Одесса. – 2009. – № 7. – С. 147-152.
3. Колосов Д.Л. Експериментальні дослідження міцності оболонки гумотросового каната / Д.Л. Колосов, Г.І. Танцура // Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта 2014: Материалы межн. науч. конф. – Дніпропетровськ: НГУ, 2014. – С. 136-146.
4. Колосов Л.В. Научные основы разработки и применения резинотросовых канатов подъемных установок глубоких рудников / Л.В. Колосов. – Дис... докт. наук: 05.05.06, 01.02.06. – Днепропетровск, 1987. – 426 с.
5. Kolosov D. Analytical determination of stress-strain state of rope caused by the transmission of the drive drum traction / D. Kolosov, O. Dolgov, A. Kolosov // Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining. – CRC Press/Balkema. – Netherlands. – 2014. – P. 499-504.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Процівим В.В.