

© І.В. Бельмас¹, Д.Л. Колосов², С.В. Онищенко²,
О.І. Білоус¹, Г.І. Танцура¹, П.В. Черниш²

¹ Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське, Україна

² Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН КОМПОЗИТНОГО ТЯГОВОГО ОРГАНА З ПОРУШЕНОЮ СТРУКТУРОЮ ВНАСЛІДОК РЕОЛОГІЇ ЕЛАСТОМІРНОЇ ОБОЛОНКИ

© I. Belmas¹, D. Kolosov², S. Onyshchenko², O. Bilous¹, H. Tantsura¹, P. Chernysh²

¹ Dniprovsk State Technical University, Kamianske, Ukraine

² Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

STRESS-STRAIN STATE OF A COMPOSITE TRACTIVE ELEMENT WITH A BROKEN STRUCTURE DUE TO ELASTOMER SHELL RHEOLOGY

Мета. Встановлення залежності зміни напружено-деформованого стану гумотросового тягового органа з порушеною структурою внаслідок реології гумової оболонки.

Методика. Аналітичне розв'язання моделі гумотросового тягового органа з порушеною структурою внаслідок реології гумової оболонки.

Результати. Розроблено алгоритм визначення напружено-деформованого стану гумотросового тягового органа з порушеною структурою внаслідок реології гумової оболонки. Наведений алгоритм передбачає розбиття каната на дві частини, що дозволяє враховувати вплив залежності модуля зсуву від деформацій у вигляді ламаної лінії, складеної з двох відрізків. Розбиття каната в області розриву суцільності троса на три та більше частини дозволить враховувати більш складну залежність модуля зсуву від деформацій зсуву. Встановлено механізм зміни напружено-деформованого стану гумотросового каната внаслідок реології гумової оболонки. Проаналізовано локальний вплив змін властивостей еластичного матеріалу, що взаємодіє з ушкодженим тросом, на напружено-деформований стан гумотросового тягового органа з порушеною структурою.

Наукова новизна. Механізм впливу змінного в часі, нелінійно залежного від деформацій модуля зсуву матеріалу оболонки гумотросового каната (стрічки) з розривом суцільності троса, на напружено-деформований стан композитного тягового органа.

Практична значущість. Врахування реології гумової оболонки надає можливість прогнозування напруженого стану з урахуванням нелінійного закону зміни властивостей гуми в процесі її використання і підвищення безпеки та надійності експлуатації гумотросових тягових органів. Локальна зміна механічних показників не збільшує небезпеку використання каната з розривами неперервності тросів. Зростання довжин перерозподілу сил та переміщень вимагає збільшення довжини сходинок стикового з'єднання.

Ключові слова: механічні властивості гуми, напружено-деформований стан, композитний тяговий орган, вантовий канат, ушкодження каната, реологія гумової оболонки, порушена структура каната, розрив суцільності троса.

Вступ. Композитні тягові органи (гумотросові канати) підйомних машин, стрічки конвеєрів входять до складу виконавчих органів ряду підйомно-транспортних машин. В мостових спорудах для утримання міжпрольотних конструкцій

можуть використовуватися композитні вантові канати. Вони мають значні довжини. Конвеєрні стрічки значної довжини створюють шляхом з'єднання стрічок, що постачаються виробниками, довжиною до 300 м. Стрічка конвеєра не має кінця – вона замкнена. Замикання стрічки забезпечується стикуванням її кінців.

Стрічки складені з паралельних тросів, розташованих в одній площині в еластичній оболонці. Експлуатуються протягом значного часу. Механічні властивості їхніх складових дещо змінюються, накопичуються ушкодження. В стикових з'єднаннях троси стрічок, канатів не з'єднані між собою механічно. Передача сил від тросів відбувається прошарками гуми, що розташована між тросами. Також не є з'єднаними механічно і частини тросів на ділянці відновлення тягової спроможності каната (стрічки). Загальною особливістю і стикових з'єднань на ділянках з розривами тросів є локальне порушення структури стрічки (каната), наявність розривів суцільності тросів та, як наслідок, значні деформації зсуву прошарків гуми, що розташована між тросами, та нерівномірне розподілення сил між останніми.

Канати та стрічки навантажені силами розтягу. Ці сили для кожного перерізу каната (стрічки) циклічно змінюються. Кожен цикл навантажень призводить до зростання залишкових деформацій. Змінюється взаємне розташування тросів. Змінюється кількісний та якісний характер їх взаємодії. Залежність напружено-деформованого стану каната (стрічки) з локальними порушеннями від механічних властивостей складових каната (стрічки), викликає зміну їх напружено-деформованого стану в процесі експлуатації. Врахування останнього є актуальною науково-технічною задачею, розв'язання якої сприяє підвищенню безпеки та ефективності використання підйомно-транспортних машин з плоскими гнучкими гумотросовими тяговими органами.

Огляд літератури та формулювання задачі дослідження. В роботі [1] запропоновано метод аналізу ушкоджень текстильних конвеєрних стрічок. В публікації [2] надані результати досліджень впливу зовнішніх чинників, зокрема проколів стрічки на її знос. Пошкодження стрічки досліджуються і в роботі [3]. Пошкодження стрічки з використанням гіпотези, що рух об'єкта на стрічці є коливальним, гармонійним, та згасає з часом, досліджується в роботах [4, 5]. В останній – з використанням методу сил.

В роботі [6] напружений стан матеріалів, армованих паралельними елементами, запропоновано визначати методом електричного моделювання. Методика визначення окремих характеристик композитних матеріалів з системою паралельних елементів армування запропонована в статті [7]. В роботі [8] обґрунтована потреба відновлення ушкодженої стрічки. Вплив розривів елементів армування стрічки на її експлуатаційні показники проаналізовано в публікаціях [9–17]. Результати дослідження напруженого стану гнучкого тягового органа, армованого поздовжніми суцільними елементами та з кінематичним зв'язком із приводними шківками, наведені в роботі [18]. В роботі [19] дано перелік та аналіз окремих типів з'єднань гумотросових стрічок. В роботах [20, 21] досліджено напружений стан та надійність з'єднань. Вплив на міцність викривлень тросів під час виготовлення стрічок досліджено в роботах [22, 23]. Напружений стан стрічки

конвеєра, каната підйомно-транспортної машини, з урахуванням її технічного стану та особливостей конструкції машини, наведено в роботах [24–30]. Напружений стан каната зі змінною за його довжиною кількістю тросів в перерізах досліджено в статтях [31–33].

Результати наведених робіт не можуть бути використані для визначення напружено-деформованого стану гумотросового каната (стрічки) з локальними змінами їх конструкцій та з урахуванням залишкових деформацій гуми, її старіння за час їх експлуатації. Встановлення залежності зміни напружено-деформованого стану гумотросового тягового органа з порушеною структурою внаслідок реології гумової оболонки є **актуальною науково-технічною задачею**.

Основна частина дослідження. Сили навантаження тросів та їхні переміщення без урахування старіння гуми, відповідно з [10], визначаються залежностями

$$p_i = E F \sum_{m=1}^{M-1} \left[\left(A_m e^{\beta_m x} - B_m e^{-\beta_m x} \right) \beta_m \cos(\mu_m (i - 0,5)) \right] + P, \quad (1)$$

$$u_i = \sum_{m=1}^{M-1} \left[\left(A_m e^{\beta_m x} + B_m e^{-\beta_m x} \right) \cos(\mu_m (i - 0,5)) \right] + \alpha + \frac{P x}{E F}, \quad (2)$$

де M – кількість тросів в канаті; i – порядковий номер троса ($1 \leq i \leq M$); A_m, B_m – сталі інтегрування; E, F – відповідно, приведений модуль пружності на розтяг та площа поперечного перерізу троса каната (стрічки); x – вісь координат, спрямована вздовж каната; P – середнє навантаження тросів каната;

$$\beta_m = \sqrt{2 \frac{G b k_G}{(h-d) E F} [1 - \cos(\mu_m)]}; \quad \mu_m = \frac{\pi m}{M}; \quad h - \text{відстань між тросами}; \quad b - \text{товщина каната}; \quad d - \text{діаметр троса}; \quad G - \text{модуль зсуву еластичного (гумового) прошарку, що з'єднує троси}; \quad k_G - \text{коефіцієнт впливу форми гуми, розташованої між тросами на жорсткість зсуву}; \quad \alpha - \text{переміщення каната як жорсткого тіла}.$$

Природна зміна механічних властивостей в процесі старіння еластичної оболонки пов'язана зі зміною модуля пружності та модуля зсуву. Згідно (1) та (2) останній впливає на напружено-деформований стан каната. Прийmemo, що нам відомий закон зміни модулю зсуву еластичного (гумового) прошарку. Його значення задамо наступним виразом

$$G = G_0 f(t), \quad (3)$$

де G_0 – модуль зсуву після виготовлення каната (стрічки) ($t = 0$).

Сформулюємо фізичну модель деформування каната з M тросів значної довжини. Трос за номером J має розрив неперервності. Розташований він в перерізі, що безмежно віддалений від обох країв каната. Канат навантажено силою розтягу. Сила розтягу забезпечує середнє навантаження його тросів, що дорівнює одиниці. Вздовж каната спрямуємо вісь x . Початок осі координат розташуємо в перерізі розриву троса. Розглянемо його частину, для якої ($0 \leq x \leq \infty$).

З умови обмеженості переміщень тросів та сил їх навантажень при безмежному зростанні координати x прийmemo $A_m = 0$. Переміщення каната, як жорсткого тіла будемо вважати рівним нулю. Тоді (1) та (2) набувають вигляду

$$p_i = -EF \sum_{m=1}^{M-1} \left[B_m e^{-\beta_m^* x} \beta_m^* \cos(\mu_m (i-0,5)) \right] + P, \quad (4)$$

$$u_i = \sum_{m=1}^{M-1} \left[B_m e^{-\beta_m^* x} \cos(\mu_m (i-0,5)) \right] + \frac{P x}{EF}, \quad (1 \leq i \leq M), \quad (5)$$

де $\beta_m^* = \sqrt{\frac{2G_0 f(t) b k_G}{(h-d)EF} [1 - \cos(\mu_m)]}$.

Переміщення усіх тросів, за винятком ушкодженого, в перерізі $x = 0$ відсутні. Переміщення ушкодженого троса позначимо як U_0 . Переміщення тросів в перерізі $x = 0$ задамо як добуток U_0 та δ -функції на обмеженій довжині осі дискретних номерів тросів. Вказане дозволяє з виразу (5) визначити вектор невідомих сталих інтегрування через одну невідому величину

$$B_m = \frac{2}{M} U_0 \cos(\mu_m (J-0,5)). \quad (6)$$

Невідому U_0 знайдемо з умови, що сила навантаження (4) ушкодженого троса дорівнює нулю

$$U_0 = \frac{P M}{2 E F \sum_{m=1}^{M-1} \cos^2(\mu_m (J-0,5)) \beta_m^*}. \quad (7)$$

Вирази (4) – (7) дозволяють визначити напружено-деформований стан каната значної довжини у разі ушкодження довільного троса з урахуванням терміну старіння його еластичної оболонки на момент розриву троса.

Відомі переміщення тросів (5) дозволяють визначити взаємний зсув тросів. Різниця зсувів суміжних тросів супроводжується виникненням дотичних напружень в еластичній оболонці. Максимальних значень останні набувають в площині розташування осей тросів каната. В цій площині відстані поміж найближчими точками на поверхнях суміжних тросів мінімальні. Тангенси кутів зсуву визначаються наступним виразом

$$\operatorname{tg}(\gamma_j) = \frac{u_j - u_{j+1}}{h}, \quad (1 \leq j < M), \quad (8)$$

де j – номер прошарку.

В роботі [11] для каната типу ГТК-3150, складеного з п'яти тросів, виконано дослідження розподілу внутрішніх сил та тангенсів кутів зсуву еластичної оболонки каната в площині розташування центрів перерізів тросів. Доведено, що

навантаження тросів, зумовлені розривом суцільності одного з них, призводять до локального перерозподілу сил практично лише між двома тросами – ушкодженим та суміжним з ним. Відповідно, у випадку ушкодження некрайнього троса, сили практично зміняться лише в трьох тросах – ушкодженому та двох суміжних з ним. Екстремальні значення внутрішніх сил навантаження тросів не залежать від зміни модуля зсуву матеріалу гуми в часі.

Другою особливістю впливу властивостей гуми на напружено-деформований стан каната є нелінійний характер залежності модуля зсуву від деформацій. Канати і стрічки сприймають циклічні навантаження. Кожне циклічне навантаження супроводжується накопиченням залишкових деформацій. Останнє також проявляється через зміну модуля зсуву в локальній зоні збурення напружено-деформованого стану еластичної оболонки каната (стрічки). Дослідимо локальний вплив змін властивостей еластичного матеріалу, що взаємодіє з ушкодженим тросом.

Вище показано, що максимальні зсуви еластичної оболонки каната виникають в шарах гуми, розташованих біля ушкодженого троса, та в області розриву його суцільності. Будемо вважати, що на частині каната довжиною l_0 в частинах гумових прошарків, які взаємодіють з ушкодженим тросом, матеріал прошарків має відмінний від інших прошарків модуль зсуву. Виокремимо цю частину каната довжиною l_0 , яка включає три троси. Механічні властивості, діаметри тросів та крок їх розташування відповідають параметрам тросів каната. Відмінність полягає у відмінному модулі зсуву матеріалу еластичної оболонки каната. Вказана відмінність відповідає відмінності значення модуля зсуву за значних зсувів – нелінійного закону деформування. Таке уявлення відповідає закону деформування у вигляді ламаної лінії, що складається з двох частин.

Скористаємося вище сформульованою фізичною моделлю деформування каната з M тросів, що має трос з номером J з розривом неперервності в перерізі $x = 0$. В ній додатково будемо вважати, що в області розриву троса гума, що його з'єднує з іншими, має відмінний модуль пружності гуми на зсув на довжині l_0 (рис. 1). На рисунку 1 в канаті виділені три групи тросів.

До складу крайніх груп не входить ушкоджений трос. Середня група складається з трьох тросів – ушкодженого та суміжних з ним. Розглянемо вказані групи як окремі стрічки – смуги. Утвореним смугам надамо номери 1 – 3. Першій смузі належить перший трос каната. Тросам в кожній смузі також надамо номери від одиниці. Зростають номери смуг від першого троса каната. Перша та третя смуги мають, відповідно $J - 1$ та $M - J$ тросів. Друга смуга має три троси. В ній середній – ушкоджений. Троси з'єднані таким чином, що перший та третій трос середньої смуги деформуються та сприймають навантаження такі, як $J - 1$ трос першої смуги та перший трос третьої смуги.

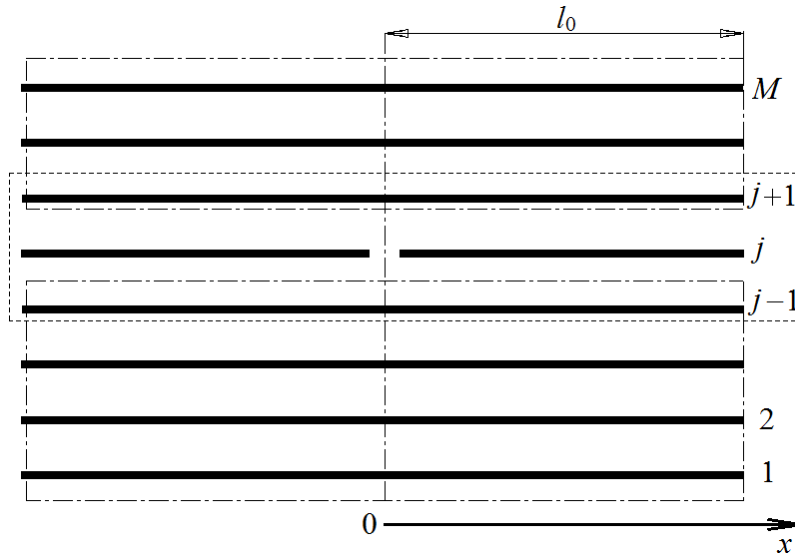


Рис. 1. Канат з ушкодженим тросом

Характерною властивістю таких смуг каната є те, що поміж тросами кожної зі смуг властивості еластичного матеріалу незмінні. За межами виокремленої частини каната довжиною l_0 канат має реальну побудову. Вказане дозволяє використовувати для смуг умови їх рівноваги та форми рішень (1) та (2) з урахуванням кількості тросів в смугах та властивостей еластичної оболонки

$$p_{\rho,i,x} = EF \sum_{m=1}^{N_{\rho}-1} \left[\left(A_{\rho,m} e^{\beta_{\rho,m}x} - B_{\rho,m} e^{-\beta_{\rho,m}x} \right) \beta_{\rho,m} \cos(\mu_{\rho,m}(i_{\rho} - 0,5)) \right] + P, \quad (9)$$

$$u_{\rho,i,x} = \sum_{m=1}^{N_{\rho}-1} \left[\left(A_{\rho,m} e^{\beta_{\rho,m}x} + B_{\rho,m} e^{-\beta_{\rho,m}x} \right) \cos(\mu_{\rho,m}(i_{\rho} - 0,5)) \right] + \alpha_{\rho} + \frac{Px}{EF}, \quad (i=1, \dots, N_{\rho}), \quad (10)$$

де ρ – номер смуги першої частини гумотросової стрічки (каната), $\rho=1, \dots, 3$;

$$\mu_{\rho,m} = \frac{\pi m}{N_{\rho}}; \quad m=1,2,\dots,\rho-1; \quad \beta_{\rho,m} = \sqrt{\frac{2G_{\rho}b}{(h-d)EF} [1 - \cos(\mu_{\rho,m})]};$$

$$N_{\rho} = \begin{cases} J-1 & (\rho=1) \\ 3 & (\rho=2); \quad G_1 = G_3 = G; \quad G_2 = Gk; \\ M-J & (\rho=3) \end{cases}$$

k – коефіцієнт зміни значення модуля зсуву за значних напружень; i – номери тросів кожної з трьох смуг; $\alpha_1 = \alpha_3 = 0$.

На належність номерів тросів до утворених смуг, вказаних у вигляді нижніх індексів, для зручності, далі вказувати не будемо, оскільки вони збігаються з номерами смуг. З умови симетричності каната відносно перерізу $x=0$,

переміщення перерізів тросів першої та третьої смуг приймаємо рівними нулю в цьому перерізі

$$u_{1,i,x=0} = u_{3,i,x=0} = 0. \quad (11)$$

Підставимо (10) в (11). Отримаємо

$$B_{\rho,m} = -A_{\rho,m}, \quad (\rho = 1, 3).$$

Вирази (9), (10) набудуть наступних форм

$$p_{\rho,i,x} = EF \sum_{m=1}^{N_{\rho}-1} \left[A_{\rho,m} S(\rho, i, x, m) \cos(\mu_{\rho,m}(i-0,5)) \right] + P, \quad (12)$$

$$\text{де } S(\rho, i, x, m) = \left(e^{\beta_{\rho,m}x} + (-1)^{\rho} e^{-\beta_{\rho,m}x} \right) \beta_{\rho,m}.$$

$$u_{\rho,i,x} = \sum_{m=1}^{N_{\rho}-1} \left[A_{\rho,m} W(\rho, i, x, m) \cos(\mu_{\rho,m}(i-0,5)) \right] + \alpha_{\rho} + \frac{Px}{EF}, \quad (13)$$

$$\text{де } W(\rho, i, x, m) = \left(e^{\beta_{\rho,m}x} - (-1)^{\rho} e^{-\beta_{\rho,m}x} \right).$$

Розглянемо характер деформування середньої смуги. Врахуємо розрив троса за номером J в перерізі $x = 0$ та переміщення суміжних тросів каната. Складемо вираз для граничної умови його деформування

$$u_{2,i,x=0} = \begin{cases} 0 & (i=1) \\ U_0 & (i=2), \\ 0 & (i=3) \end{cases} \quad (14)$$

де U_0 – невідоме переміщення перерізу ушкодження тросу за номером J .

Умова (14) становить собою розривну функцію. Задамо її рядом Фур'є на осі номерів тросів кінченої довжини

$$u_{2,i,x=0} = \frac{2}{3} \sum_{m=1}^2 \left[U_0 \cos(\mu_{2,m}(2-0,5)) \cos(\mu_{2,m}(i-0,5)) \right] + \frac{2}{3} U_0. \quad (15)$$

Підставимо (11) в умову (15). Отримаємо

$$A_{2,m} + B_{2,m} = \frac{2}{3} U_0 \cos(\mu_{2,m}(2-0,5)), \quad \alpha_2 = \frac{1}{3} U_0.$$

Підставимо отримані співвідношення у вирази (9) та (10). Отримаємо вирази сил та переміщень тросів

$$p_{2,i,x} = EF \sum_{m=1}^2 \left[\left(A_{2,m} S(2,i,x,m) - \frac{2}{3} U_0 \cos(\mu_{2,m}(2-0,5)) e^{-\beta_{2,m}x} \right) \times \right. \\ \left. \times \beta_{2,m} \cos(\mu_{2,m}(i-0,5)) + P \right], \quad (16)$$

(1 ≤ i ≤ 3).

$$u_{2,i,x} = \sum_{m=1}^2 \left[\left(A_{2,m} W(2,i,x,m) + \frac{2}{3} U_0 \cos(\mu_{2,m}(2-0,5)) e^{-\beta_{2,m}x} \right) \cos(\mu_{2,m}(i-0,5)) \right] + \\ + \frac{1}{3} U_0 + \frac{Px}{EF}, \quad (1 \leq i \leq 3). \quad (17)$$

Навантаження ушкодженого троса в перерізі розриву його неперервності дорівнює нулю. Скористаємося цим. З виразу (16) знайдемо невідоме переміщення перерізу ушкодження троса

$$U_0 = \frac{\frac{P}{EF} + \sum_{m=1}^2 \left[A_{2,m} S(2,2,0,m) \beta_{2,m} \cos(\mu_{2,m}(2-0,5)) \right]}{\frac{2}{3} \sum_{m=1}^2 \cos^2(\mu_{2,m}(2-0,5)) \beta_{2,m}}.$$

Функції розподілу внутрішніх сил навантаження тросів першої частини та їх переміщень для різних груп тросів задамо як єдині дві функції

$$p_{i,x}^* = \frac{2}{M} \sum_{n=1}^{M-1} \left[\sum_{j=1}^{J-2} \left[p_{1,j,x} \cos(\mu_n(j-0,5)) \right] + \sum_{j=J-1}^{J+1} \left[p_{2,j-J+2,x} \cos(\mu_n(j-0,5)) \right] + \sum_{j=J+2}^{M-1} \left[p_{3,j-J-1,x} \cos(\mu_n(j-0,5)) \right] \right] \cos(\mu_n(i-0,5)) + P, \quad (18)$$

$$u_{i,x}^* = \frac{2}{M} \sum_{n=1}^{M-1} \left[\sum_{j=1}^{J-2} \left[u_{1,j,x} \cos(\mu_n(j-0,5)) \right] + \sum_{j=J-1}^{J+1} \left[u_{2,j-J+2,x} \cos(\mu_n(j-0,5)) \right] + \sum_{j=J+2}^{M-1} \left[u_{3,j-J-1,x} \cos(\mu_n(j-0,5)) \right] \right] \times \\ \times \cos(\mu_n(i-0,5)) + \sum_{j=J-1}^{J+1} \frac{u_{2,j-J+2,0}}{M} + \frac{Px}{EF}, \quad (i = 1, \dots, M), \quad (19)$$

де $\mu_m = \frac{\pi m}{M}$.

Друга частина вище прийнята безмежно довгою. З умови обмеженого зростання навантажень та переміщень тросів, з безмежним зростанням координати x , приймемо вирази (1) та (2) для визначення сил та переміщень тросів другої частини в наступній формі

$$P_{i,x}^{**} = -EF \sum_{n=1}^{M-1} \left[B_n e^{-\beta_n x} \beta_n \cos(\mu_n (i-0,5)) \right] + P, \quad (20)$$

$$u_{i,x}^{**} = \sum_{n=1}^{M-1} \left(B_n e^{-\beta_n x} \right) \cos(\mu_n (i-0,5)) + \frac{P x}{E F}, \quad (i=1, \dots, M), \quad (21)$$

де $\beta_n = \sqrt{\frac{2G b}{(h-d)EF} [1 - \cos(\mu_n)]}$.

Визначені внутрішні сили навантаження тросів першої частини та їх переміщення мають дорівнювати відповідним значенням для тросів другої частини в перерізі $x = l_0$

$$P_{i,(x=l_0)}^* = P_{i,(x=l_0)}^{**}, \quad (22)$$

$$u_{i,(x=l_0)}^* = u_{i,(x=l_0)}^{**}. \quad (23)$$

Прирівняємо значення розподілів сил та переміщень в перерізі $x = l_0$ відповідно до умов (22), (23). Отримаємо систему алгебраїчних рівнянь порядку $2(M-1)$. Розв'язання системи дозволяє визначити невідомі сталі виразів розподілів сил та переміщень (18) – (21). Визначені переміщення надають можливість розрахувати значення максимальних кутів зсуву гуми поміж тросами за наступним виразом

$$\operatorname{tg}(\gamma_j) = \begin{cases} \frac{u_j^* - u_{j+1}^*}{h} & (x < l_0) \\ \frac{u_j^{**} - u_{j+1}^{**}}{h} & (x \geq l_0) \end{cases}, \quad (1 \leq j < M). \quad (24)$$

З використанням залежностей (18) – (21), визначених значень невідомих сталих, виконали розрахунок напружено-деформованого стану каната типу ГТК-3150, складеного з семи тросів, в якому середній трос на значній відстані від країв має розрив неперервності. Довжина ділянки з відмінним (меншим удвічі) модулем зсуву гуми біля троса з розривом суцільності – 0,1 м. Канат навантажений зусиллям, що забезпечує середнє одиничне навантаження кожного троса. На рисунках 2–4 показані розподіли переміщень, внутрішніх сил навантаження

тросів, максимальні тангенси кутів зсуву гуми між тросами для випадку відмінного та незмінного модуля зсуву гуми.

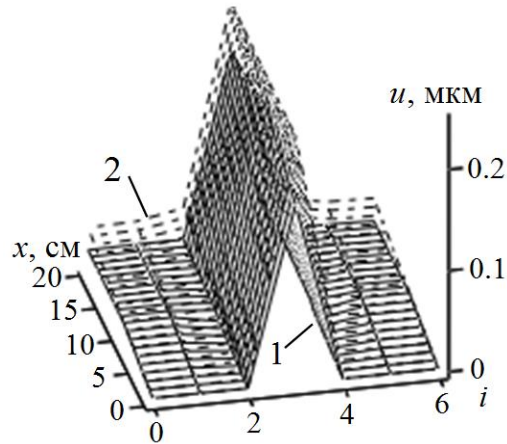


Рис. 2. Переміщення перерізів каната з ушкодженим середнім тросом:
 1 – модуль зсуву гуми на ділянці $0 \leq x \leq l_0$ менший удвічі,
 2 – модуль зсуву гуми незмінний по довжині каната

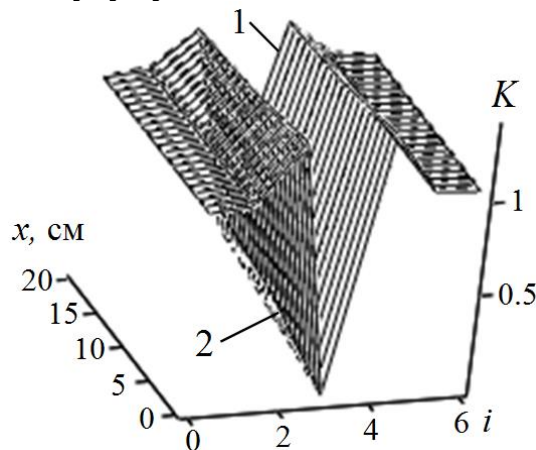


Рис. 3. Внутрішні сили, якими навантажені троси каната з ушкодженням середнім

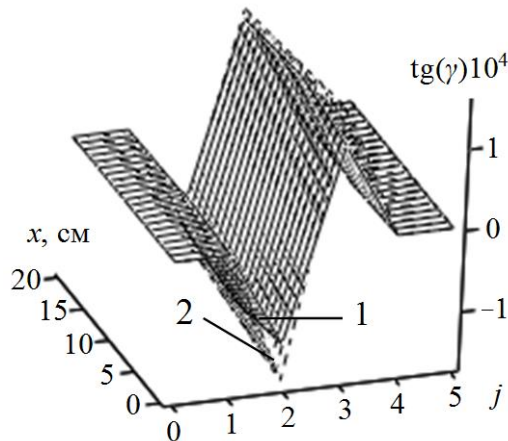


Рис. 4. Тангенси максимальних кутів зсуву гуми, що розташована між тросами в канаті з ушкодженням середнім тросом

Наведені рисунки свідчать про відсутність впливу локальної зміни модуля зсуву біля перерізу розриву неперервності троса та про незначне зниження максимальних кутів зсуву гуми в цій зоні. З урахуванням змінного модуля зсуву, дотичні напруження внаслідок локального збурення напруженого стану гуми в області розриву суцільності троса, менші. Відношення максимальних тангенсів кутів для випадку незмінності модуля зсуву та за локального його зменшення менші, ніж відношення значень вказаного параметра.

Звернемо увагу на те, що зміна модуля зсуву гуми в математичній моделі каната відтворюється зміною характеристичного показника β . Він як співмножник, разом з координатою, спрямованою вздовж осі каната, є аргументом експоненти. Відповідно, у разі незмінності відношень характеристичного показника та значення координати x , значення експоненти будуть незмінними. Показники напружено-деформованого стану каната будуть збігатися лише в різних перерізах каната. Загалом, локальна зміна механічних показників не збільшує небезпеку використання каната з розривами неперервності тросів. Зростання довжин перерозподілу сил та переміщень вимагає збільшення довжини сходинок стикового з'єднання.

Висновки. В роботі виконано аналітичне встановлення залежностей зміни напруженого стану композитного (гумотросового) тягового органа з порушеною структурою з урахуванням реології гумової оболонки. Сформульовано алгоритм визначення напруженого стану композитного тягового органа з порушеною структурою та проявами реології гумової оболонки. Наведений алгоритм передбачає розбиття каната на дві частини. Це дозволяє враховувати вплив залежності модуля зсуву від деформацій у вигляді ламаної, складеної з двох відрізків. Розбиття каната в області розриву суцільності троса на три та більше частини дозволить враховувати більш складну залежність модуля зсуву від деформацій зсуву. Урахування реології гумової оболонки надає можливість прогнозування напруженого стану з урахуванням нелінійного закону зміни властивостей гуми в процесі її використання та підвищення безпеки та надійності експлуатації гумотросових тягових органів.

Перелік посилань

1. Fedorko, G., Molnár, V., Michalik, P., Dovica, M., Tóth, T., & Kelemenová, T. (2016). Extension of inner structures of textile rubber conveyor belt – Failure analysis. *Engineering Failure Analysis*, 70, 22–30.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.07.006>
2. Bajda, M., Błażej, R., & Hardygóra, M. (2016). Impact of Selected Parameters on the Fatigue Strength of Splices on Multiply Textile Conveyor Belts. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 44, 052021.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/44/5/052021>
3. Błazej, R., Jurdzia, L., Burduk, R., Kirjanow, A., & Kozłowski, T. (2017). Analysis of core failure distribution in steel cord belts on the cross-section. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management*, 17(13), 987-994.
<https://doi.org/10.5593/sgem2017/13/S03.125>

4. Grincova, A., Andrejiova, M., & Marasova, D. (2016). Failure analysis of conveyor belt in terms of impact loading by means of the damping coefficient. *Engineering Failure Analysis*, 68, 210–221.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.06.006>
5. Marasová, D., Ambriško, L., Andrejiová, M., & Grinčová, A. (2017). Examination of the process of damaging the top covering layer of a conveyor belt applying the FEM. *Measurement*, 112, 47–52.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.08.016>
6. Kolosov, L.V., & Belmas, I.V. (1981). Primenenie elektricheskikh modelei dlya issledovaniya kompozitnikh materialov. *Mekhanika kompozitnikh materialov*, 1, 115–119.
7. Dariya Zade S. (2013). Chislennaya metodika opredeleniya effektivnykh kharakteristik odnonapravleno armirovannykh kompozitov. *Bulletin NTU “KhPI”*, (58), 71–77.
8. Mei, X., Miao, C., Yang, Y., & Li, X. (2016). Automatic detection method for mine conveyor belt surface damage. *Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society*, 41, 259–265.
<https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2015.1182>
9. Volokhovskiy, V.Yu., Radin, V.P., & Rudyak, M.B. (2010). Kontsentratsiya usiliy v trosakh i nesushchaya sposobnost' rezinotrosovykh konveyernykh lent s povrezhdeniyami. *MEI Bulletin*, (5), 5–12.
10. Bel'mas, I.V. (1993). Stress state of rubber-rope tapes during their random damages. *Problemy Prochnosti i Nadezhnos'ti Mashin*, (6), 45–48.
11. Бельмас, І.В., Колосов, Д.Л., Чечель, Т.О., Воробйова, О.М., & Черниш, О.М. (2020). Вплив зміни в часі механічних властивостей гуми на напружений стан гумотросового тягового органа з ушкодженим тросом. *Збірник наукових праць НГУ*, 62, 149–155.
<https://doi.org/10.33271/crpnmu/62.149>
12. Song, W., Shang, W., & Li, X. (2009). Finite element analysis of steel cord conveyor belt splice. *ET Conference Publications*, 2009(556).
<https://doi.org/10.1049/cp.2009.1415>
13. Бельмас, І.В., & Бобильова, І.Т. (2012). Вплив поривів тросів на міцність плоского тягового органу. *Recueil des exposes des participants de VI Conference internationale scientifique et methodique du 11-18 jctobre 2012 sur l'le de Djerba (Tunise) Donetsk*, 88–91.
14. Kolosov, L.V., & Belmas, I.V. (1990). Issledovanie mekhanicheskikh kharakteristik metallotrosov. *Izvestiya vuzov. Gornii zhurnal*, 9, 81–83.
15. Kolosov, L.V., & Belmas, I.V. (1990). Issledovanie prochnostnikh kharakteristik obraztsov povrezhdennikh rezinotrosovykh lent. *Izvestiya vuzov. Gornii zhurnal*, 8, 81–84.
16. Kolosov, L.V., & Belmas, I.V. (1991). Eksperimentalnie issledovaniya agregatnoi prochnosti RTL. *Izvestiya vuzov. Gornii zhurnal*, 1, 85–87.
17. Ropai, V.A. (2016). *Shakhtnie uravnoveshivayushchie kanati: monografiya*. Natsionalnii gornii universitet.
18. Бельмас, І.В., Колосов, Д.Л., Білоус, О.І., & Бобильова, І.Т. (2019). Дослідження напруженого стану гнучкого тягового органу з кінематичним зв'язком. *Збірник наукових праць VIII Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні РТМЕ 2019» 4-8 лютого 2019р. Івано-Франківськ – Яремче*, 72–73.
19. Kolosov, L.V., & Belmas, I.V. (1990). Analiz skhem stikovikh soedinenii rezinotrosovykh lent. *Izvestiya vuzov. Gornii zhurnal*, 2, 83–85.
20. Levchenya, Zh.V. (2004). *Povyshenie nadezhnosti stykovykh soedineniy konveyernykh lent na gornodobyvayushchikh predpriyatiyakh: Na primere RUP "PO "Belaruskaliy"* Ph.D. MGOU.
21. Танцур, Г.І. (2010). *Гнучкі тягові органи. Стикові з'єднання конвеєрних стрічок. Монографія*. ДДТУ.
22. Kolosov, L.V., & Belmas, I.V. (1991). Napryazheno-deformirovannoe sostoyanie rezinotrosovoi lenti s iskrivlennimi trosami. *Izvestiya Vuzov. Gornii zhurnal*, 7, 65–69

23. Kolosov, L.V., Belmas, I.V., & Kiba, V.Ya. (1991). Vliyanie iskrivlenii trosov rezinotrosovoi lenti na yee prochnost. *Gornaya elektromenika i avtomatika*, 59.
24. Ropai, V., & Belmas, I. (1990). Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya rezinotrosovoi lenti transporternogo konveiera. *Zeszyty naukowe Polltechnkl Slaskiej. Seria: Gornlctwo*, 182, 113–118.
25. Бельмас, І.В., & Колосов, Л.Д. (2008). Розподіл зусиль в причепному пристрої плоского тягового органу. *Математичне моделювання. Науковий журнал*, 1(18), 33–35.
26. Бельмас, І.В., Сабурова, І.Т., & Конох, Ю.В. (2009). Напруження в оболонці плоского каната на виконавчому органі підйомно-транспортної машини. *Підйомно-транспортна техніка. Науковий журнал*, 4.
27. Бельмас, І.В., Колосов, Д.Л., Даніяров, Н.А., Танцура А.І., & Карсакова, А.Ж. (2013). Napryazhennoe sostoyanie ploskoi rezinotrosovoi lenti na barabane podemno-transportnoi mashini. *Universitet yenbekteri. Trudi universiteta*, 3, 75–77.
28. Belmas, I.V., Kolosov, D.L., & Kolosov, O.L. (2014). Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya rezinotrosovogo kanata na uchastke perekhoda k trubchatoi forme. *Vestnik PNIPU.Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*, 12, 48–55
29. Belmas, I., Kolosov, D., Dolgov, O., & Tantsura, G. (2017). The stress-strain state of the flat rope of hoisting engine with considering their technical state. *Innovations in science and education: challenges of our tame. Collection of scientific papers*. 191–196.
30. Бельмас, І.В., Колосов, Д.Л., & Білоус, О.І. (2018). Взаємодія гумотросового каната з приводним барабаном. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки), Тематичний випуск. Машини і пластична деформація металу*, 168–173.
31. Бельмас, І.В., Білоус, О.І., & Конох, Ю.М. (2010). Деформування ступінчатого каната на шківі підйомної машини. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promishlennost*, 3, 109–112.
32. Бельмас, І.В., Колосов, Д.Л., & Бобильова, І.Т. (2009). Врахування дотичних напружень при автоматизованому конструювання ступінчастого каната. *Stalnie kanati. Sbornik nauchnikh trudov*, 7, 147–152.
33. Belmas, I.V., Blokhin, S.E., & Kolosov, D.L. (2010). Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie tyagovogo organa stupenchatoi konstruksii v bobinnoi namotke. *Stalnie kanati. Sbornik nauchnikh statei*, 71–78.

ABSTRACT

Purpose. Establishing a dependency of change in a stress-strain state for a rubber-cable tractive element with broken structure due to rheology of a rubber shell.

Methods. Analytical solution of a model of a rubber-cable tractive element with a broken structure due to rheology of a rubber shell.

Results. An algorithm for determining a stress-strain state of a rubber-cable tractive element with a broken structure due to rheology of a rubber shell is developed. The suggested algorithm involves splitting the rope into two parts, which allows considering the influence of a dependency of shear modulus on deformations in a form of a broken line constructed of two segments. Splitting the rope in the area of integrity breakage into three or more parts allows considering a more complex dependency of shear modulus on shear deformations. A mechanism of changing a stress-strain state of a rubber-cable rope due to rheology of a rubber shell is established. The local influence of changes in properties of elastic material interacting with a damaged cable on a stress-strain state of a rubber-cable tractive element with a broken structure is analyzed.

Scientific novelty. A mechanism of influence of a shear modulus of rubber shell material in the rubber-cable rope (belt) with a cable integrity breakage on stress-strain state of composite tractive element is established to be time-varying and nonlinearly dependent on deformations.

Practical significance. Consideration of shell rubber rheology makes it possible to predict a rope stress state considering a non-linear law of changes in properties of rubber during its use and to increase safety and operational reliability of rubber-cable tractive elements. A local change in mechanical parameters does not increase the danger of using a rope with continuity breakages of cables. An increase in lengths of redistribution of forces and displacements requires an increase in length of steps in butt-joint connections.

Keywords: *mechanical properties of rubber, stress-strain state, composite tractive element, stay rope, rope damage, rubber shell rheology, broken rope structure, cable continuity breakage.*