

© І.В. Бельмас<sup>1</sup>, Д.Л. Колосов<sup>2</sup>, С.В. Онищенко<sup>2</sup>, І.Т. Бобильова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське, Україна

<sup>2</sup> Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

## ЧАСТКОВЕ ВІДНОВЛЕННЯ ТЯГОВОЇ СПРОМОЖНОСТІ ГУМОТРОСОВОГО ТЯГОВОГО ОРГАНА З УШКОДЖЕНОЮ ТРОСОВОЮ ОСНОВОЮ

© I. Belmas<sup>1</sup>, D. Kolosov<sup>2</sup>, S. Onyshchenko<sup>2</sup>, I. Bobylova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dniprovsk State Technical University, Kamianske, Ukraine

<sup>2</sup> Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

## PARTIAL RESTORATION OF TRACTIVE ABILITY OF RUBBER-CABLE TRACTIVE ELEMENT WITH DAMAGED CABLE BASE

**Мета.** Розробити алгоритм розрахунку ділянки відновлення тягової спроможності гумотросового тягового органа, що має ушкоджений трос.

**Методика дослідження** полягає у побудові методами механіки композитних матеріалів аналітичних моделей взаємодії тросів у гумотросовому тяговому органі як композитній структурі, утвореної з регулярно розташованих в одній площині паралельних тросів, що взаємодіють через шар гуми та математичному моделюванні напружено-деформованого стану гумотросового тягового органа за наявності розривів довільного троса та часткового відновлення тягової спроможності каната. Математичний опис процесу базується на засадах механіки шаруватих конструкцій із жорсткими та м'якими шарами.

**Результати дослідження.** Встановлено аналітичні залежності коефіцієнтів нерівномірності розподілу зусиль поміж тросами вздовж каната в області видалення троса, інтенсивності розподілу дотичних напружень в гумових міжтросових прошарках, нерівномірного розподілу сил розтягу тросів та моменту скручування каната з частково видаленим та заміненним тросом. Обґрунтовано доцільність заміни відрізка ушкодженого троса на відрізок цілого завдяки зменшенню максимальних дотичних напружень в гумовій оболонці відновленого тягового органа.

**Наукова новизна** полягає у встановленні аналітичних залежностей розподілу параметрів напружено-деформованого стану гумотросового тягового органа за наявності видалення та заміни частини троса каната.

**Практичне значення.** Отримані залежності дозволяють визначати раціональну довжину ділянки заміни троса та розробляти алгоритм розрахунку цієї ділянки, що забезпечує мінімальне значення коефіцієнта концентрації сил розтягу троса для будь-якого гумотросового тягового органа. Встановлені закономірності дають змогу з високим рівнем достовірності прогнозувати експлуатаційні властивості каната, включно з розривами тросової основи. Результати можуть бути використані під час проектування та експлуатації підйомно-транспортних машин з гумотросовими тяговими органами.

**Ключові слова:** підйомно-транспортна машина, гумотросовий тяговий орган, розрив тросової основи, математична модель, напружено-деформований стан, відновлення тягової спроможності.

**Вступ.** В підйомно-транспортних машинах широко використовують гумотросові стрічки та канати [1-4]. Вони складаються з системи паралельних тросів, розташованих в одній площині з незмінним кроком та укладених в еластичну (гумову, поліуретанову) оболонку. Прикладена рівномірно розподілена вздовж

ширини стрічки або каната зовнішня сила розтягу, практично рівномірно розподіляється поміж усіма тросами [5].

В процесі експлуатації гумотросові стрічки конвеєрів та канати підйомних машин руйнуються. Основною формою руйнування стрічок та канатів, що впливає на їх тягову спроможність, є розрив тросів. Розрив троса призводить до перерозподілу сил розтягу тросів у стрічці або канаті та втрати їх тягової спроможності [6-9]. Максимальний вплив на втрату тягової спроможності викликають розриви крайніх тросів. При цьому коефіцієнт концентрації залежить від кількості тросів у стрічці (канаті), коли їх кількість не перевищує восьми. Він зменшується за кількості тросів два від 2 до 1,6 [5]. Розробка методів зменшення втрати тягової спроможності, зумовленої розривами тросів – **актуальна науково-технічна задача**, розв’язання якої дозволить зменшити негативний вплив розривів тросів на експлуатаційні характеристики стрічок та канатів.

**Стан питання та постановка задачі дослідження.** Найбільш детальний аналіз напружено-деформованого стану (НДС) стрічки з розривами тросів наведено в роботі [10]. В ній показана можливість зменшення втрати тягової спроможності гумотросової стрічки шляхом часткового видалення або заміни частини ушкодженого троса. Разом з тим, в ній не отримані математичні залежності для визначення напружено-деформованого стану стрічки з частково відновленою тяговою спроможністю, зумовленою розривом довільного троса, та не визначені неврівноважені моменти скручування тягових органів на ділянці часткової втрати тягової спроможності.

**Основний зміст роботи.** Розглянемо дві запропоновані в роботі [10] схеми часткового відновлення тягової спроможності гумотросового тягового органа (рис. 1). Схема стрічки з частково видаленим тросом показана на рисунку 1, а, а із заміненним – на рисунку 1, б.

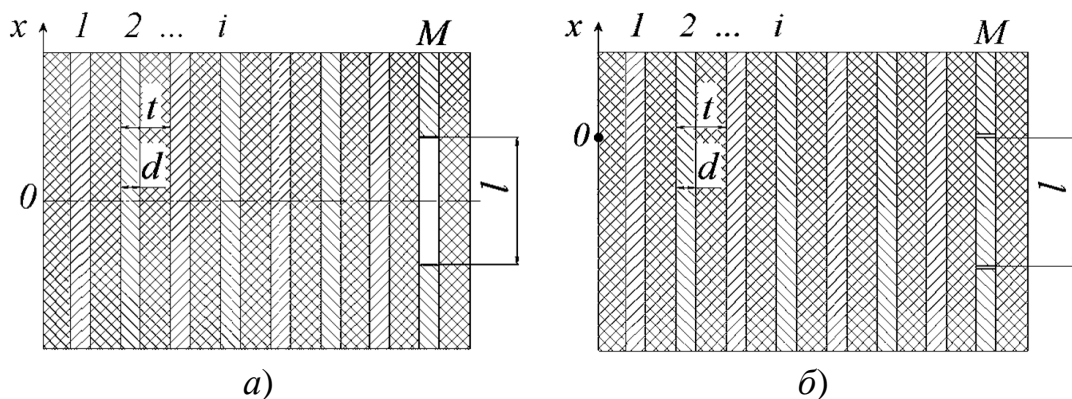


Рис. 1. Схеми стрічки з частково (на довжині  $l$ ): а – видаленим тросом, б – заміненним тросом

Система рівнянь рівноваги тросів у стрічці має вигляд [10]

$$\begin{cases} EF \frac{d^2 u_1}{dx^2} + \frac{Gk_G d}{h} (u_2 - u_1) = 0, \\ EF \frac{d^2 u_i}{dx^2} + \frac{Gk_G d}{h} (u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}) = 0, \\ EF \frac{d^2 u_M}{dx^2} + \frac{Gk_G d}{h} (u_{M-1} - u_M) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де  $u_i$  – переміщення  $i$ -го троса вздовж вісі  $x$ ;  $d$  – діаметр троса;  $h$  – відстань між тросами,  $G$  – приведений модуль зсуву матеріалу поміж тросами;  $k_G$  – коефіцієнт, що враховує вплив форми гуми, розташованої поміж тросами;  $EF$  – приведена жорсткість троса на розтяг,  $i = 1, 2, \dots, M$ ;  $M$  – кількість тросів у стрічці або канаті.

Розглянемо схему відновлення стрічки з ушкодженим тросом (рис. 1, а). Вісь  $x$  спрямуємо вздовж стрічки. Початок осі розташуємо в перерізі, що проходить крізь середину видаленого троса. На інтервалі  $-\frac{l}{2} \leq x \leq \frac{l}{2}$  кількість тросів в конструкції тягового органа менша. В перерізах  $x = \pm l/2$  вона змінюється від  $M$  до  $M - 1$ . Вказаними перерізами розділимо стрічку на три відрізки. Відрізки стрічки з кількістю тросів  $M$  позначимо номерами один та три. Проміжному відрізку надамо номер два.

Будемо вважати, що довжини першого та третього відрізків стрічки перевищують довжини, на яких локалізуються зміни напружень (крайові збурення), зумовлені зміною кількості тросів у перерізі стрічки. За такої умови зміна конструкції стрічки відбувається симетрично відносно середини ділянки з видаленим тросом. Симетричність зміни конструкції стрічки за умови незмінності сили розтягу  $P$  зумовлює симетричність напружено-деформованого її стану та дозволяє розглядати половину стрічки як напівбезмежну.

Тросам на першій та другій ділянці надамо номери  $1 \leq i \leq M$  та  $1 \leq i \leq M - 1$  відповідно. Ділянки стрічки взаємодіють між собою. За прийнятої розрахункової схеми мають місце наступні граничні умови й умови сумісності деформацій.

В перерізі  $x = l/2$  відсутнє зусилля розтягу крайнього  $M$ -го троса першого відрізка

$$p_{1,M+1} = 0. \quad (2)$$

В цьому ж перерізі зусилля розтягу тросів, їхні переміщення першого та другого відрізка попарно збігаються

$$p_{1,i} = p_{2,i} \quad (1 \leq i \leq M - 1); \quad u_{1,i} = u_{2,i} \quad (1 \leq i \leq M - 1). \quad (3)$$

На значній відстані від перерізу  $x = 0$  сили натягнення тросів першого відрізка збігаються відповідно до принципу Сен-Венана

$$x \rightarrow \infty \quad p_{1,i} = \frac{P}{M}. \quad (4)$$

В перерізі  $x = 0$  переміщення відсутні внаслідок симетрії

$$x = 0 \quad u_{2,i} = 0. \quad (5)$$

Врахувавши граничні умови (4) та (5), розв'язок системи рівнянь (1) шукаємо у формі

$$u_{1,i} = \sum_{m=1}^{M+1} B_{1,m} e^{-\beta_{1,m}x} \cos(\mu_{1,m}(i-0,5)) + \frac{Px}{MEF}, \quad (6)$$

$$u_{2,i} = \sum_{m=1}^M B_{2,m} \left( e^{-\beta_{2,m}x} - e^{\beta_{2,m}l} e^{\beta_{2,m}x} \right) \cos(\mu_{2,m}(i-0,5)) + \frac{Px}{(M-1)EF}, \quad (7)$$

де  $A_m, B_m$  – сталі інтегрування;  $\mu_{1,m} = \frac{\pi m}{M}$ ;  $\beta_{1,m} = \sqrt{2 \frac{Gb}{EF(t-d)} (1 - \cos \mu_{1,m})}$ ;  $\mu_{2,m} = \frac{\pi m}{M-1}$ ;

$$\beta_{2,m} = \sqrt{2 \frac{Gb}{EF(t-d)} (1 - \cos \mu_{2,m})}.$$

За законом Гука, значення зусиль, що виникають в тросах

$$p_{1,i} = EF \sum_{m=1}^{M+1} -B_{1,m} e^{-x} \beta_{1,m} \cos(\mu_{1,m}(i-0,5)) + \frac{P}{M}, \quad (8)$$

$$p_{2,i} = -EF \sum_{m=1}^M B_{2,m} \left( e^{-\beta_{2,m}x} + e^{\beta_{2,m}l} e^{\beta_{2,m}x} \right) \beta_{2,m} \cos(\mu_{2,m}(i-0,5)) + \frac{P}{M-1}. \quad (9)$$

Скориставшись умовами сумісності деформацій ділянок, побудуємо систему алгебраїчних рівнянь порядку  $2M$ . Розв'язавши систему рівнянь, знайдемо невідомі сталі інтегрування рівнянь рівноваги тросів у стрічці.

Для стрічки з параметрами тросів та їхнім розташуванням, що відповідають стрічці ГТС-3150, виконані розрахунки переміщень та внутрішніх зусиль розтягу тросів за умови, що на довжині  $l = 1$  м вилучено відрізок крайнього троса.

За отриманими залежностями визначали відношення внутрішнього зусилля, що виникає в тросі, до середнього зусилля в тросах цілої стрічки – коефіцієнтів нерівномірності розподілу зусиль між тросами в стрічці на ділянці  $-\frac{l}{2} \leq x \leq 0$ . На рисунку 2 наведені результати розрахунків. На представлених рисунках коефіцієнти нерівномірності на ділянці  $-\frac{l}{2} \leq x \leq 0$  видаленого відрізка троса, а далі і дотичне напруження в гумі біля нього, умовно зображені рівними нулю.

З рисунку 2 видно, що внутрішні зусилля розтягу тросів нерівномірно розподілені у стрічці на ділянці видалення частини троса та на суміжній ділянці. В крайньому тросі зусилля зростає від нуля в перерізі кінця видаленого троса. Найбільші навантаження припадають на трос, що суміжний з тросом, частина якого видалена. Зусилля набуває максимального значення в перерізі кінця троса, утвореного видаленням його частини. Зі зростанням довжини ділянки стрічки, в якій частково видалено трос, розподіл сил розтягу тросів в середній частині цієї ділянки наближається до рівномірного. Максимальне значення коефіцієнта концентрації напружень зменшується та наближається до напружень, що виникають в канаті зі зменшеною на одиницю кількістю тросів. Вказане і створює можливість

зменшити вплив розриву троса на агрегатну міцність стрічки (каната) шляхом видалення частини ушкодженого троса.

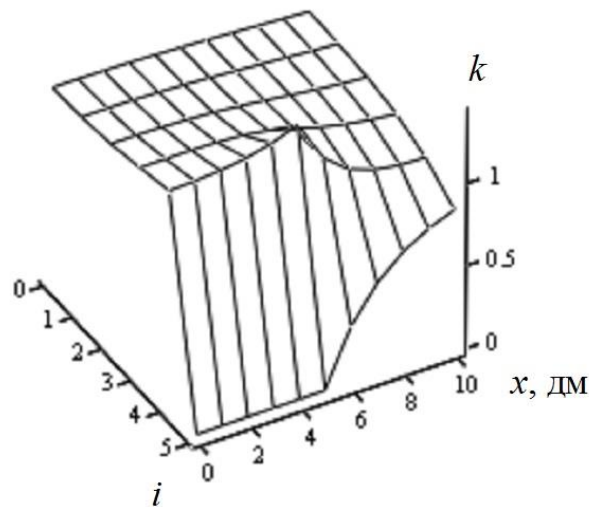


Рис. 2. Графік розподілу коефіцієнтів нерівномірності зусиль  $k$  поміж  $i$  тросами вздовж каната  $x$  в області видалення четвертого троса

В гумотросовій стрічці троси завулканізовані в гуму. Розрив троса та видалення його частини супроводжуються появою дотичних напружень у гумі. Усереднені за товщиною дотичні напруження, відповідно до закону Гука, визначаються наступною залежністю

$$\tau_i = G k_G \frac{u_{i+1} - u_i}{t - d} \quad (1 \leq i \leq M - 1).$$

На рисунку 3 графічно зображена інтенсивність розподілених дотичних зусиль у гумових міжтросових прошарках.

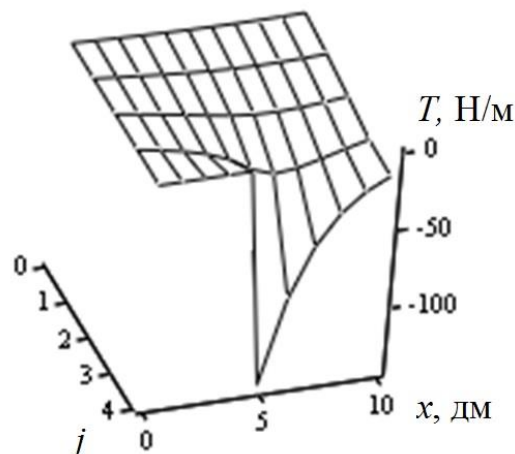


Рис. 3. Інтенсивність розподілених дотичних зусиль у гумових міжтросових прошарках  $j$

Наведені залежності розподілу дотичних напружень дозволяють зробити висновок, що максимальні напруження діють у гумі, розташованій поміж ушкодженим та цілим тросами. Вони зменшуються зі зростанням довжини видаленої

ділянки троса та наближаються до значень максимальних напружень, що виникають в канаті зі зменшеною на одиницю кількістю тросів.

Разом з тим відзначимо, що видалення частини троса призводить не тільки до нерівномірного розподілу сил поміж тросами, але і до порушення умови парності тросів у стрічці (канаті). Вказані чинники спричиняють невірноваженість стрічки (каната) за скручуванням. Момент скручування каната (стрічки) визначається сумою сил скручування усіх тросів. Він залежить від величини сили, що сприймають його стренги, скручені за гвинтовими лініями, кута та напрямку скручування. Його можна записати у формі

$$M_c = \chi \sum_{i=1}^M (-1)^i p_i, \quad (10)$$

де  $\chi$  – коефіцієнт пропорційності моменту скручування каната силі його розтягу.

На рисунку 4 наведено графік розподілу моменту скручування стрічки з шести тросів, в якій видалений крайній трос.

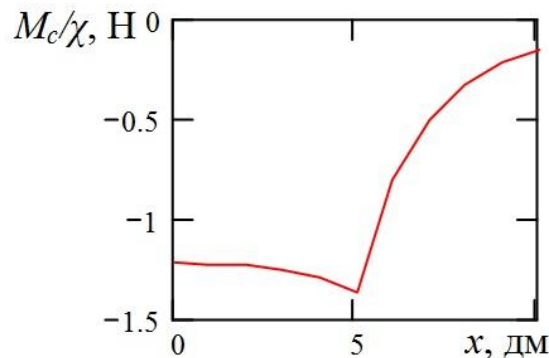


Рис. 4. Момент скручування каната з частково видаленим тросом

Відповідно до рисунку 4, найбільший момент невірноваженості виникає на ділянці видалення троса. Враховуючи їх значну кількість в стрічці конвеєра, ця невірноваженість несуттєво вплине на роботу конвеєра. Для канатів підйомних машин, що мають значно меншу кількість тросів, часткове видалення троса можливе, коли вантаж переміщують з обмеженням його повороту, наприклад в стовбурах шахт.

Розглянемо особливості напружено-деформованого стану стрічки за схеми відновлення, показаній на рисунку 1, б. В перерізах  $x = 0$  та  $x = -l$  крайній  $M$  трос має розриви суцільності. Для отримання рішення, прийнятеного для будь-якого троса будемо вважати, що розриви суцільності має  $k$ -тий трос. Перерізами, в яких розташовано розриви тросів, розділимо стрічку на три відрізки. Крайні відрізки будемо вважати безмежно довгими. За такої умови зміна конструкції стрічки відбувається симетрично відносно середини ділянки з заміненним відрізком троса.

В перерізі  $x = 0$  відсутнє зусилля розтягу  $k$ -го троса першого відрізка, а сили розтягу тросів попарно дорівнюють одна одній

$$p_{1,k} = 0; \quad p_{1,i} = p_{2,i} \quad (i \neq k). \quad (11)$$

В цьому ж перерізі переміщення тросів першого та другого відрізка, за винятком  $k$ -го троса попарно збігаються

$$u_{1,i} = u_{2,i} \quad (i \neq k); \quad u_{1,k} \neq u_{2,k}. \quad (12)$$

На значній відстані від перерізу  $x = 0$  сили натягнення тросів першого відрізка відповідно до принципу Сен-Венана збігаються за своїми значеннями

$$x \rightarrow \infty \quad p_{1,i} = \frac{P}{M}. \quad (13)$$

В перерізі  $x = -l/2$ , внаслідок симетрії, відсутні переміщення

$$u_{2,i} = 0. \quad (14)$$

Врахувавши граничні умови (11) та (12), розв'язок системи рівнянь (1) для першого та другого відрізків шукатимемо у формі

$$u_{1,i} = \sum_{m=1}^M B_{1,m} e^{-\beta_m x} \cos(\mu_{1,m}(i-0,5)) + c, \quad (15)$$

$$u_{2,i} = \sum_{m=1}^M B_{2,m} (e^{-\beta_m x} - e^{\beta_m l} e^{\beta_m x}) \cos(\mu_{1,m}(i-0,5)) + \frac{Px}{MEF}, \quad (16)$$

де  $c$  – стала інтегрування;  $\beta_m = \sqrt{2 \frac{Gb}{EF(t-d)} (1 - \cos \mu_m)}$ ;  $\mu_m = \frac{\pi m}{M}$ .

За законом Гука, значення зусиль, що виникають у тросах

$$p_{1,i} = EF \sum_{m=1}^M -B_{1,m} e^{-\beta_m x} \beta_m \cos(\mu_{1,m}(i-0,5)) + \frac{P}{M}, \quad (17)$$

$$p_{2,i} = -EF \sum_{m=1}^M B_{2,m} (e^{-\beta_m x} + e^{\beta_m l} e^{\beta_m x}) \beta_m \cos(\mu_{1,m}(i-0,5)) + \frac{P}{M}. \quad (18)$$

Умову (12) задамо розривною функцією, що описує різницю переміщень тросів у перерізі  $x = 0$ . При цьому введемо додаткову невідому сталу – величину зазору, що створюється поміж кінцями  $k$ -го троса в цьому перерізі

$$u_{1,i} - u_{2,i} = \begin{cases} 0 & i \neq k \\ U_0 & i = k \end{cases}. \quad (19)$$

Номери тросів будемо розглядати як дискретну вісь координат з кінченою кількістю точок, що дорівнює кількості тросів у стрічці. Залежність (19) подамо у вигляді наступної суми

$$u_{1,i} - u_{2,i} = U_0 \frac{2}{M} \sum_{m=1}^M \cos(\mu_{1,m}(k-0,5)) \cos(\mu_{1,m}(i-0,5)) + U_0 \frac{1}{M}. \quad (20)$$

Використання функції (19) дозволяє знайти невідомі сталі у виразах переміщень (15), (16) та сил (17), (18) з умови сумісності деформацій відрізків стрічки (11)

$$B_{2,m} = -U_0 \frac{2}{M} \frac{\cos(\mu_{1,m}(k-0,5))}{(1 - 2e^{\beta_m l})}, \quad B_{1,m} = -U_0 \frac{2}{M} \frac{(1 + e^{\beta_m l})}{(1 - 2e^{\beta_m l})} \cos(\mu_{1,m}(k-0,5)),$$

$$c = U_0 \frac{1}{M}.$$

Невідому величину зазору поміж краями  $k$ -го троса  $U_0$  в перерізі  $x = 0$  знайдемо з умови (11)

$$U_0 = - \frac{P}{2EF \sum_{m=1}^M \frac{(1 + e^{\beta_m l})}{(1 - 2e^{\beta_m l})} \cos(\mu_{1,m}(k - 0,5))^2 \beta_m}.$$

Знайдені значення переміщень тросів дозволяють визначити дотичні напруження в гумових прошарках поміж тросами. Відповідно до закону Гука

$$\tau_{1,i} = \frac{G k_G}{t - d} \sum_{m=1}^M B_{1,m} e^{-\beta_m x} \left[ \cos(\mu_{1,m}(i - 0,5 \pm 1)) - \cos(\mu_{1,m}(i - 0,5)) \right], \quad (21)$$

$$\tau_{2,i} = \frac{G k_G}{t - d} \sum_{m=1}^M B_{2,m} \left( e^{-\beta_m x} - e^{\beta_m l} e^{\beta_m x} \right) \left[ \cos(\mu_{1,m}(i - 0,5 \pm 1)) - \cos(\mu_{1,m}(i - 0,5)) \right]. \quad (22)$$

Отримані вирази в замкненому аналітичному вигляді забезпечують визначення напружено-деформованого стану стрічки із заміненним на заданій довжині відрізком троса. Вони показують значне (до 30-35%) зменшення максимальних дотичних напружень в гумовій оболонці стрічки, відповідно і доцільність заміни відрізка ушкодженого троса на відрізок цілого. Зменшення максимальних дотичних напружень під час ремонту стрічки є доцільним і через те, що повторна вулканізація не забезпечує міцнісні характеристики гуми, отримані нею за першої вулканізації – під час її виготовлення.

Отримані результати стосовно ефективності заміни видаленого відрізка троса дозволяють стверджувати, що у разі ушкодження троса, негативний вплив локального порушення структури стрічки – джерела збурень можна зменшити, штучно розрізавши той самий трос на відстані від розриву, що дорівнює довжині заміненого відрізка троса.

Практично часткове відновлення тягової спроможності пов'язано з визначенням остаточної його міцності – максимальних коефіцієнтів нерівномірності розподілу внутрішніх сил розтягу тросів та дотичних напружень. Їх можна визначити із виразів (18), (21) та (22) врахувавши, що максимальні сили розтягу тросів діють в  $k \pm 1$ -му тросі (суміжному з ушкодженим) в перерізі  $x = 0$ , а максимальні дотичні напруження в гумі – поміж  $k \pm 1$ -им та ушкодженим  $k$ -тим тросом

$$p_{\max} = EF \sum_{m=1}^M -B_{1,m} \beta_m \cos(\mu_{1,m}(k + \lambda)) + \frac{P}{M}, \quad (23)$$

$$\tau_{\max} = \frac{G k_G}{t - d} \sum_{m=1}^M B_{1,m} \left[ \cos(\mu_{1,m}(k + \lambda)) - \cos(\mu_{1,m}(k - 0,5)) \right], \quad (24)$$

$$\tau_{\max,k} = \frac{G k_G}{t - d} \sum_{m=1}^M B_{2,m} \left( 1 - e^{\beta_m l} \right) \left[ \cos(\mu_{1,m}(k + \lambda)) - \cos(\mu_{1,m}(k - 0,5)) \right], \quad (25)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт, що приймає значення  $\lambda = 0,5$  для троса з номером  $k + 1$ ,  $\lambda = -1,5$  для троса з номером  $k - 1$ .



Відзначимо, що дотичні напруження, визначені за залежністю (24) відповідають напруженням у гумі на ділянці з основним тросом стрічки, а напруження, визначені залежністю (25) – на ділянці з заміненим відрізком  $k$ -го троса.

Відповідно до залежності (23) максимальне зусилля на ділянці часткового відновлення тягової спроможності стрічки залежить від довжини заміненого відрізка. Довжину такого відрізка, за якої коефіцієнти нерівномірності розподілу сил тросів набувають мінімальних значень, визначимо, прирівнявши нулю похідну за  $l$  від максимальної сили розтягу тросів (в перерізі  $x = 0$ )

$$\sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{M-1} \left\{ \left[ \beta_m (e^{\beta_n l} - 1 + 2e^{2\beta_n l}) e^{-\beta_m x} - (1 + 2e^{\beta_m l}) e^{\beta_n l} \beta_n \right] e^{\beta_m l} + e^{\beta_n l} \beta_n \right\} \times \left. \begin{aligned} & \times \frac{-3\beta_m \cos(\mu_m (k + \lambda)) \cos(\mu_m (k - 0,5))}{(2e^{\beta_m l} - 1)^2 \beta_n \cos^2(\mu_n (k - 0,5)) (1 + e^{\beta_n l})^2} \end{aligned} \right\} = 0. \quad (26)$$

У виразі (26) раціональну довжину ділянки заміни троса слід обирати для більш навантаженого троса. Розв'язання трансцендентного рівняння (26) відносно довжини  $l$  дозволяє встановити її раціональне значення.

Нерівномірний розподіл сил розтягу тросів також викликає появу неврівноваженого моменту на ділянці гумотросового каната з частково заміненим тросом. Результати його розподілу, визначені за залежністю (10) наведені на рисунку 5.

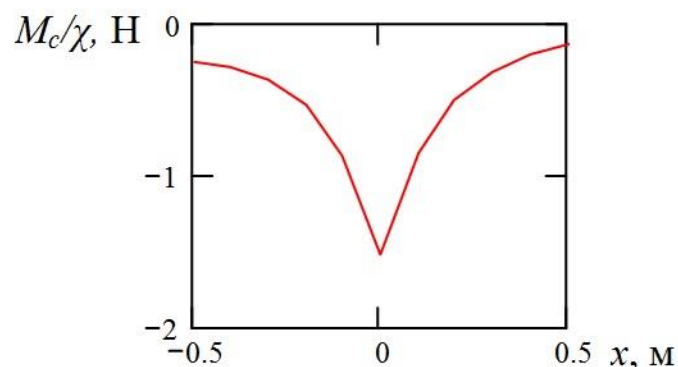


Рис. 5. Момент скручування каната з частково заміненим тросом

Відповідно до рисунку 5, найбільший момент неврівноваженості виникає в перерізі розриву суцільності троса. Як і для випадку частково видаленого троса, неврівноваженість несуттєво вплине на роботу конвеєра. Для канатів підйомних машин, що мають значно меншу кількість тросів, врівноважування моменту має бути забезпечено конструкцією підіймача.

**Основні висновки та рекомендації.** Отримані в роботі аналітичні залежності дозволяють для будь-якого гумотросового каната (стрічки) визначати раціональну довжину відрізка заміни ушкодженого троса в канаті, встановлення якого забезпечить мінімальне значення коефіцієнта концентрації сил розтягу троса, чим розв'язати актуальну задачу мінімізації втрати тягової спроможності стрічки (каната) у разі його пошкодження – розриву. Результати досліджень мо-

жуть бути використані під час проектування та експлуатації підйомно-транспортних машин з гумотросовими тяговими органами.

#### Перелік посилань

1. Grujić, M., & Erdeljan, D., (2014). Advantages of high angle belt conveyors (nac) in mining. *Applied Mechanics and Materials*, (68), 73–77. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.683.73.
2. Kolosov, D., Dolgov, O., Bilous, O., & Kolosov, A. (2015). The stress-strain state of the belt in the operating parameters changes of the burdening conveyor. *Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*, 585-590.
3. Аверченков, В.И., Давыдов, С.В., Дунаев, В.П., & Ивченко, В.Н. (2004). *Конвейеры с подвесной лентой: монография*. Москва: Машиностроение.
4. Педченко, О.С. (2007). Определение геометрических параметров желоба подвесной конвейерной ленты. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, (6), 373-376.
5. Колосов, Л.В. (1987). *Научные основы разработки и применения резинотросовых канатов подъемных установок глубоких рудников*. Дис. докт. наук: 05.05.06, 01.02.06. ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины, Днепропетровск.
6. Belmas, I., Kolosov, D., Bilous, O., & Onyshchenko, S. (2018). Stress-strain state of a conveyor belt with cables of different rigidity and their breakages. *Fundamental and applied researches in practice of leading scientific schools*, 26(2), 231–238.
7. Бельмас, І.В., & Бобильова, І.Т. (2012). Вплив поривів елементів армування на міцність плоского тягового органу. *Les problemes contemporains de la technosphere et de la formation des cadres d'ingenieurs. Proceedings of the 6th International Scientific and Methodical Conference*, Донецьк, 88-91.
8. Бельмас, І.В., & Колосов, Д.Л. (2017). Напружено-деформований стан плоского каната зумовлений поривами тягових елементів та конструкцією барабана підйомної машини. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*, (50), 163-170.
9. Колосов, Д.Л., & Білоус, О.І. (2016). Напружено-деформований стан гумотросового каната трубчастій форми з ушкодженим тросом замка. *Гірничя електромеханіка та автоматика*, (97), 99-103.
10. Танцура, Г.І. (2010). *Гнучкі тягові органи в машинобудуванні. Стикові з'єднання конвеєрних стрічок: монографія*. Дніпродзержинськ: ДДТУ.

#### АННОТАЦІЯ

**Цель.** Разработать алгоритм расчета участка восстановления тяговой способности резинотросового тягового органа, имеющего поврежденный трос.

**Методика исследования** заключается в построении методами механики композитных материалов аналитических моделей взаимодействия тросов в резинотросовом тяговом органе как композитной структуре, образованной из регулярно расположенных в одной плоскости параллельных тросов, взаимодействующих через слой резины и математическом моделировании напряженно-деформированного состояния резинотросового тягового органа при наличии разрывов произвольного троса и частичного восстановления тяговой способности каната. Математическое описание процесса базируется на принципах механики слоистых конструкций с жесткими и мягкими слоями.

**Результаты исследования.** Установлены аналитические зависимости коэффициентов неравномерности распределения усилий между тросами вдоль каната в области удаления троса, интенсивности распределения касательных напряжений в резиновых межтросовых слоях, неравномерного распределения сил растяжения тросов и момента скручивания каната с частично

удаленным и замененным тросом. Обоснована целесообразность замены отрезка поврежденного троса на отрезок целого вследствие уменьшения максимальных касательных напряжений в резиновой оболочке восстановленного тягового органа.

**Научная новизна** заключается в установлении аналитических зависимостей распределения параметров напряженно-деформированного состояния резинотросового тягового органа при удалении и замене части троса каната.

**Практическое значение.** Полученные зависимости позволяют определять рациональную длину участка замены троса и разрабатывать алгоритм расчета этого участка, что обеспечивает минимальное значение коэффициента концентрации сил растяжения троса для любого резинотросового тягового органа. Установленные закономерности позволяют с высокой степенью достоверности прогнозировать эксплуатационные свойства каната, включительно с разрывами тросовой основы. Результаты могут быть использованы при проектировании и эксплуатации подъемно-транспортных машин с резинотросовыми тяговыми органами.

**Ключевые слова:** *подъемно-транспортная машина, резинотросовый тяговый орган, разрыв тросовой основы, математическая модель, напряженно-деформированное состояние, восстановление тяговой способности.*

#### ABSTRACT

**Purpose.** Development of a calculation algorithm of a part of restoration of tractive ability of rubber-cable tractive element, which has a broken cable.

**Methodology of research** is in construction of analytical models of interaction of cables in a rubber-cable tractive element using methods of mechanics of composite materials and in mathematical modeling of a stress-strain state of a rubber-cable tractive element with random cable breakages and partial restoration of rope tractive ability. Rubber-cable tractive element is considered a composite structure of parallel cables regularly placed in the same plane, which interact through a layer of rubber. Mathematical description of the process is based on mechanics of layered structures with hard and soft layers.

**Findings.** Analytical dependencies of coefficients of uneven distribution of forces between cables along a rope in an area of cable removal; distribution intensity of tangent stresses in rubber layers between cables; uneven distribution of tensile forces and twisting moment of a rope with partially removed and replaced cable are established. Expediency of replacing a part of a broken cable with a new part is justified by reducing maximum tangent stresses in a rubber shell of a restored tractive element.

**Scientific novelty** is in establishment of analytical dependencies of distribution of parameters of a stress-strain state of a rubber-cable tractive element with removed and replaced cable part.

**Practical significance.** Obtained dependencies allow determining rational length of a cable replacement part and developing an algorithm for calculating this part, which ensures minimum value of a coefficient of concentration of tensile forces of a cable for any rubber-cable tractive element. Established patterns make it possible to predict rope performance with high accuracy, including the cases of cable base breakages. Results can be used during design and operation of lifting and transporting machines with rubber-cable tractive elements.

**Keywords:** *lifting and transporting machine, rubber-cable tractive element, cable base breakage, mathematical model, stress-strain state, restoration of tractive ability.*