

© І.В. Бельмас<sup>1</sup>, Д.Л. Колосов<sup>2</sup>, Т.О. Чечель<sup>2</sup>, О.М. Воробйова<sup>2</sup>, О.М. Черниш<sup>2</sup>  
<sup>1</sup> Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське, Україна  
<sup>2</sup> Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

## ВПЛИВ ЗМІНИ В ЧАСІ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГУМИ НА НАПРУЖЕНИЙ СТАН ГУМОТРОСОВОГО ТЯГОВОГО ОРГАНА З УШКОДЖЕНИМ ТРОСОМ

© I. Belmas<sup>1</sup>, D. Kolosov<sup>2</sup>, T. Chechel<sup>2</sup>, O. Vorobiova<sup>2</sup>, O. Chernysh<sup>2</sup>  
<sup>1</sup> Dniprovsk State Technical University, Kamianske, Dnipro, Ukraine  
<sup>2</sup> Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

## INFLUENCE OF CHANGE DURING THE MECHANICAL PROPERTIES OF RUBBER ON THE STRESSED STATE OF A RUBBER TRACTION BODY WITH A DAMAGED CABLE

**Мета.** Встановлення впливу зміни в часі властивостей гуми на напружений стан гумотросового тягового органа з ушкодженим тросом.

**Методика дослідження** полягає в аналітичному розв'язанні моделі гумотросового тягового органа з урахуванням розриву суцільності троса та зміни властивостей гуми.

**Результати дослідження.** Встановлено залежності зміни напруженого стану гумотросового тягового органа з порушеною структурою внаслідок реології гумової оболонки. Сформульовано алгоритм визначення напруженого стану гумотросового тягового органа з порушеною структурою та проявами реології гумової оболонки. Показано, що навантаження тросів, зумовлені розривом суцільності одного з них, призводять до локального перерозподілу сил практично лише поміж двома тросами – ушкодженим та суміжним з ним; у випадку ушкодження не крайнього троса сили практично змінюються лише в трьох тросах – ушкодженому та двох суміжних з ним. При цьому екстремальні значення внутрішніх сил навантаження тросів не залежать від зміни модуля зсуву матеріалу гуми в часі. Встановлено, що значні зсуви гуми відбуваються поміж ушкодженим тросом та суміжним з ним на довжині каната; кути зсуву гуми поміж іншими тросами значно менші відносно зсувів в зоні локального перерозподілу сил та напружень і несуттєво змінюються внаслідок старіння гуми в часі.

**Наукова новизна.** Встановлено механізм впливу змін властивостей гуми на напружений стан тягового органа з урахуванням розриву суцільності троса та зміни властивостей гуми.

**Практичне значення.** Врахування залежності напружено-деформованого стану каната з локальними порушеннями тросової основи від зміни механічних властивостей гуми надає можливість прогнозування напруженого стану каната задля підвищення безпеки та надійності використання гумотросових тягових органів, що мають значний термін експлуатації.

**Ключові слова:** *підйомно-транспортна машина, гумотросовий тяговий орган, гумова оболонка, механічні властивості, експлуатаційні зміни, розрив суцільності, реологія, механіка шаруватих композитних конструкцій, математична модель, аналітичне розв'язання, напружено-деформований стан.*

**Вступ.** Гумотросові канати підйомних машин мають значні довжини та експлуатуються впродовж тривалого часу. Вони складаються з розташованих в одній площині у гумовій матриці паралельних тросів. Механічні властивості їх

складових змінюються з часом, накопичуються ушкодження. Для часткового відновлення тягової спроможності каната, стрічки з ушкодженим тросом виконують дії з реновації.

В стикових з'єднаннях троси стрічок, канатів не з'єднані поміж собою механічно. Передача сил від тросів забезпечується прошарками гуми, що розташована поміж тросами. Загальною особливістю стикових з'єднань, ділянок з частково відновленою тяговою спроможністю каната і на ділянках з розривами тросів, є наявність розривів суцільності тросів. В зонах розривів тросів спостерігаються значні деформації зсуву прошарків гуми, що розташована поміж тросами, нерівномірне розподілення сил поміж останніми.

**Стан питання та постановка задачі дослідження.** В роботах [1, 2] запропоновані методики визначення окремих характеристик композитних матеріалів з системою паралельних елементів армування. Вплив розривів тросів каната на його експлуатаційні показники проаналізовано в роботах [3 - 6]. Виконувалися аналогічні дослідження і для каната змінного по довжині перерізу [7, 8]. В роботах [9 - 11] досліджено напружений стан та надійність з'єднань.

Гума з'єднує троси в канаті, забезпечує їх взаємодію. Її властивості змінюються, зменшується міцність, витривалість, навіть під час зберігання [12, 13]. Експериментально [14] підтверджене лінійне зростання модуля пружності гуми з часом, показано зменшення її межі міцності.

Врахування залежності напружено-деформованого стану каната з локальними порушеннями тросової основи від зміни механічних властивостей гуми, є **актуальною науково-технічною задачею**. Її розв'язання сприяє підвищенню безпеки та ефективності використання підйомно-транспортних машин з гумотросовими тяговими органами, що мають значний термін експлуатації.

**Основний зміст роботи.** Для визначення впливу змін механічних характеристик гуми на напружений стан каната з ушкодженим тросом скористаємося відомими виразами внутрішніх сил навантаження тросів та їх переміщень [6]

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

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

де  $M$  – кількість тросів в канаті;  $i$  – 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;  $x$  – вісь координат, спрямована вздовж каната;  $P$  – середнє навантаження тросів каната;  $\beta_m = \sqrt{2 \frac{G b k_G}{(h - d) E F} [1 - \cos(\mu_m)]}$ ;

$\mu_m = \frac{\pi m}{M}$ ;  $h$  – відстань поміж тросами;  $b$  – товщина каната;  $d$  – діаметр троса;  $G$  – модуль зсуву еластичного (гумового) прошарку, що з'єднує троси;  $k_G$  – коефіцієнт впливу форми гуми, розташованої поміж тросами на жорсткість зсуву;  $\alpha$

– переміщення каната як жорсткого тіла.

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

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

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

Визначимо напружено-деформований стан каната значної довжини з розривом суцільності одного довільного троса за номером  $J$ . Розрив будемо вважати розташованим на значніших відстанях від країв каната, наприклад по середині каната значної довжини. Врахуємо симетричність каната. Розглянемо його половину ( $0 \leq x \leq \infty$ ). Переріз розриву троса сумістимо з перерізом початку осі координат ( $x = 0$ ). З умови обмеженості переміщень тросів, сил їх навантажень при безмежному зростанні координати  $x$ , приймемо  $A_m = 0$ . Переміщення каната, як жорсткого тіла будемо вважати рівним нулю. Тоді (1) та (2) набувають вигляду

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

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

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 усіх тросів в перерізі  $x = 0$  задамо як добуток сталої величини  $U_0$  та  $\delta$ -функції на осі дискретних номерів тросів. Вказане дозволяє з виразу (5) визначити вектор невідомих сталих 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 в перерізі розриву його неперервності дорівнює нулю

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

Вирази (4) - (7) дозволяють визначати напружено-деформований стан каната значної довжини підйомної машини у разі ушкодження довільного троса з урахуванням терміну старіння еластичної оболонки. А відомі переміщення (5) дозволяють визначати взаємний зсув тросів. Різниця зсувів суміжних тросів су-

проводжується виникненням дотичних напружень в гумовій оболонці. Максимальних значень останні набувають в площині розташування осей тросів каната. В цій площині відстані між 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.

Для каната типу ГТК-3150 складеного з п'яти тросів, визначимо розподіли внутрішніх сил та тангенсів кутів зсуву еластичної оболонки каната в площині розташування центрів перерізів тросів. Прийmemo, що внаслідок природних змін властивостей гуми модуль зсуву зріс удвічі. Зовнішнє навантаження прикладемо таким, щоби середнє навантаження тросів дорівнювало одиниці. Відзначені внутрішні сили навантаження тросів в такому випадку дорівнюють коефіцієнту нерівномірності навантаження тросів. Результати для випадків  $f(t) = 2$  (крива 1) та  $f(t) = 1$  (крива 2) наведені на рисунках 1 та 2.

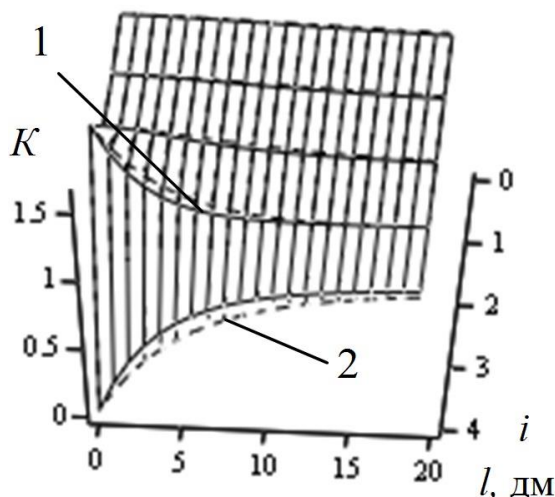


Рис. 1. Розподіл коефіцієнтів нерівномірності навантаження тросів з номерами  $i$  на довжині каната  $l$

Відповідно до графіків (рис. 1) навантаження тросів, зумовлені розривом суцільності одного з них, призводять до локального перерозподілу сил практично лише поміж двома тросами – ушкодженим та суміжним з ним. Відповідно, у випадку ушкодження не крайнього троса сили практично зміняться лише в трьох тросах – ушкодженому та двох суміжних з ним. Суттєво сили змінюються на довжині до 2 м. Екстремальні значення внутрішніх сил навантаження тросів не залежать від зміни модуля зсуву матеріалу гуми в часі.

Про незначний вплив на кути зсуву гуми поміж тросами каната свідчить і розподіл тангенсів кутів зсуву гуми (рис. 2).

Значні зсуви гуми спостерігаються лише поміж ушкодженим тросом та суміжним з ним на довжині каната. Кути зсуву гуми поміж іншими тросами значно менші відносно зсувів в зоні локального перерозподілу сил та напружень. Вони

мало змінюються внаслідок старіння гуми в часі. Висоти підняття вантажів з використанням гумотросових канатів та стрічок перевищують 100 м. Вказане дозволяє вважати обґрунтованим прийняте вище припущення стосовно безмежної довжини каната та безмежної відстані від розриву троса до кінця стрічки (каната).

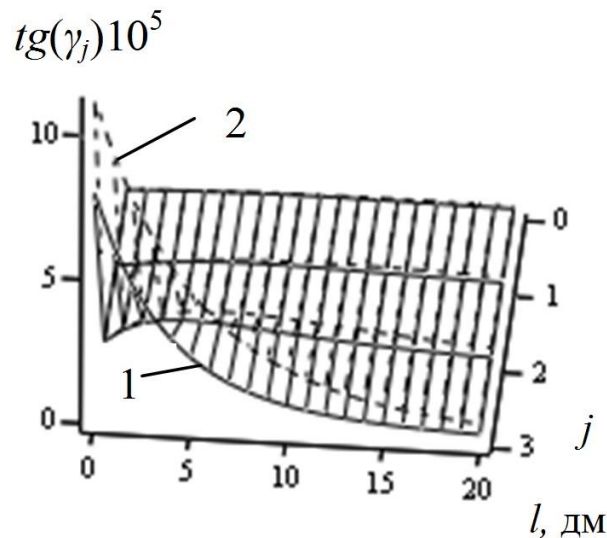


Рис. 2. Розподіл тангенсів максимальних кутів зсуву матеріалу, розташованого в прошарках з номерами  $j$  між тросами на довжині каната  $l$

**Висновки.** Шляхом аналітичного розв’язання моделі гумотросового тягового органа з порушеною структурою та наслідками реології гумової оболонки, встановлені залежності зміни напруженого стану гумотросового тягового органа з порушеною структурою внаслідок реології гумової оболонки.

В процесі розв’язання моделі сформульовано алгоритм визначення напруженого стану гумотросового тягового органа з порушеною структурою та проявами реології гумової оболонки. Встановлено механізм зміни напруженого стану гумотросового каната внаслідок реології гумової оболонки.

Урахування старіння гумової оболонки надає можливість прогнозування напруженого стану каната в процесі його використання, що підвищує безпеку та надійність використання гумотросових тягових органів.

#### Перелік посилань

1. Колосов, Л.В., & Бельмас, И.В. (1981). Применение электрических моделей для исследования композитных материалов. *Механика композитных материалов*, (1), 115-119.
2. Дария, З. С. (2013). Численная методика определения эффективных характеристик однонаправленно армированных композитов. *Вісник Національного технічного університету ХПІ. Сер.: Динаміка і міцність машин*, (58), 71-77. [http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/8603/1/vestnik\\_HPI\\_2013\\_58\\_Dariya\\_Zade\\_Chislennaya.pdf](http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/8603/1/vestnik_HPI_2013_58_Dariya_Zade_Chislennaya.pdf)
3. Волоховский, В. Ю., Радин, В. П., & Рудяк, М. Б. (2010). Концентрация усилий в тросах и несущая способность резиновых конвейерных лент с повреждениями. *Вестник МЭИ*, (5), 5-12.
4. Бельмас, И.В. (1993). Напряженное состояние резиновой ленты при произвольном повреждении тросов. *Проблемы прочности и надежности машин*, (6), 45-48

5. Колосов, Л.В., & Бельмас, И.В. (1990). Исследование прочностных характеристик образцов поврежденных резинотросовых лент. *Известия вузов. Горный журнал*, (8), 81-84.
6. Belmas, I., Kolosov, D., & Tantsura, G. (2017). The stress-strain state of the flat rope of hoisting engine with considering their technical state. *Technical Sciences, Construction and Architecture*, 191-196. <http://eprints.oa.edu.ua/id/eprint/6346>
7. Бельмас, И. В., Колосов, Д. Л., Танцура, А. И., & Конох, Ю. В. (2009). Исследование влияния порыва тросовой основы на прочность каната ступенчатой конструкции. In *Необратимые процессы в природе и технике: Материалы науч. конф* (pp. 255-257).
8. Бельмас, И.В., Колосов, Д.Л., & Бобильова, И.Т. (2009). Врахування дотичних напружень при автоматизованому конструюванню ступінчастого канату. *Стальные канаты. Сборник научных трудов*, (7), 147-152.
9. Колосов, Л.В., & Бельмас, И.В. (1990). Анализ схем стыковых соединений резинотросовых лент. *Известия вузов. Горный журнал*, (2), 83-85.
10. Левченя, Ж.Б. (2004). *Повышение надежности стыковых соединений конвейерных лент на горнодобывающих предприятиях: На примере РУП "ПО "Беларуськалий":* (диссертация ... кандидата технических наук: 05.05.06).
11. Танцура, Г. І. (2010). *Гнучкі тягові органи. Стикові з'єднання конвеєрних стрічок*. ДДТУ.
12. Baldwin, J. M., Bauer, D. R., & Ellwood, K. R. (2007). Rubber aging in tires. Part 1: Field results. *Polymer Degradation and Stability*, 92(1), 103-109. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2006.08.030>
13. Bauer, D. R., Baldwin, J. M., & Ellwood, K. R. (2007). Rubber aging in tires. Part 2: Accelerated oven aging tests. *Polymer Degradation and Stability*, 92(1), 110-117. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2006.08.014>
14. Ларін, О.О. (2015). Експериментальні дослідження параметрів пружності та статичної міцності гумової суміші, що входить до складу елементів пневматичних шин після її штучного старіння. *Вісник ЖДТУ*, № 3 (74), 21 – 27. <http://eztuir.ztu.edu.ua/123456789/2487>

#### АННОТАЦИЯ

**Цель.** Установление влияния изменения во времени свойств резины на напряженное состояние резинотросового каната с поврежденным тросом.

**Методика исследования** состоит в аналитическом решении модели резинотросового тягового органа с учетом разрыва целостности троса и изменения свойств резины.

**Результаты исследования.** Установлены зависимости изменения напряженного состояния резинотросового тягового органа с нарушенной структурой вследствие реологии резиновой оболочки. Сформулировано алгоритм определения напряженного состояния резинотросового тягового органа с нарушенной структурой и проявлениями реологии резиновой оболочки. Показано, что нагружение тросов, обусловленное разрывом целостности одного из них, приводит к локальному перераспределению сил практически только между двумя тросами - поврежденным и смежным с ним; в случае повреждения не крайнего троса, силы практически изменяются только в трех тросах - поврежденном и двух смежных с ним. При этом экстремальные значения внутренних сил нагружения тросов не зависят от изменения модуля сдвига материала резины во времени. Установлено, что значительные сдвиги резины реализуются между поврежденным тросом и смежным с ним на длине каната; углы сдвига резины между другими тросами значительно меньше относительно сдвигов в зоне локального перераспределения сил и напряжений и несущественно изменяются вследствие старения резины во времени.

**Научная новизна.** Установление механизма влияния изменений свойств резины на напряженное состояние тягового органа с учетом разрыва целостности троса и изменения свойств резины.

**Практическое значение.** Учет зависимости напряженно-деформированного состояния каната с локальными нарушениями тросовой основы от изменения механических свойств резины позволяет прогнозировать напряженное состояние каната для повышения безопасности и надежности использования резинотросовых тяговых органов, имеющих значительный срок эксплуатации.

**Ключевые слова:** *подъемно-транспортная машина, резинотросовый тяговый орган, резиновая оболочка, механические свойства, эксплуатационные изменения, разрыв целостности, реология, механика слоистых композитных конструкций, математическая модель, аналитическое решение, напряженно-деформированное состояние.*

#### ABSTRACT

**Purpose.** Establishment of influence of changes of rubber properties in time on a stress-strain state of a rubber-cable tractive element with a broken cable.

**Methodology of research** is in analytical solution of a model of a rubber-cable tractive element considering the disruption of cable continuity and changes in rubber properties.

**Findings.** The dependencies of change of a stress-strain state of a rubber-cable tractive element with a disturbed structure due to rheology of a rubber shell are established. An algorithm of determining a stress-strain state of a rubber-cable tractive element with a disturbed structure and manifestations of rheology of a rubber shell is formulated. It is shown that the loads on cables caused by the continuity ruptures in one of them lead to a local redistribution of forces practically only between two cables – the damaged one and the adjacent one. In a case of damage of a non-extreme cable, the forces practically change only in three cables – the damaged one and two adjacent ones. In this case, the extreme values of internal loading forces on cables do not depend on a change in shear modulus of the rubber material over time. It is established that significant rubber shear occurs between the damaged cable and the adjacent one along the rope length. The shear angles of rubber between other cables are much smaller relative to the shear in a zone of local redistribution of forces and stresses and they change insignificantly due to the aging of rubber over time.

**Scientific novelty.** The mechanism of influence of changes in rubber properties on a stress-strain state of a tractive element considering the disruption of cable continuity and changes of rubber properties.

**Practical significance.** Consideration of dependency of a stress-strain state of a rope with local damages of a cable base on changes in rubber properties provides a possibility to predict the stress state of the rope in order to improve the operation safety and usage reliability of rubber-cable tractive elements with long-term operation.

**Keywords:** *lifting and transporting machine, rubber-cable tractive element, rubber shell, mechanical properties, operational changes, continuity rupture, rheology, mechanics of layered composite structures, mathematical model, analytical solution, stress-strain state.*