

© Д.Л. Колосов<sup>1</sup>, О.І. Білоус<sup>2</sup>, Г.І. Танцур<sup>2</sup>, С.В. Онищенко<sup>1</sup>, О.М. Воробйова<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна  
<sup>2</sup> Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське, Україна

## НАПРУЖЕНИЙ СТАН СТРІЧКИ ПОТУЖНОГО КОНВЕЄРА З РОЗРИВОМ ГРУПИ ТРОСІВ

© D. Kolosov<sup>1</sup>, O. Bilous<sup>2</sup>, H. Tantsura<sup>2</sup>, S. Onyshchenko<sup>1</sup>, O. Vorobiova<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine  
<sup>2</sup> Dniprovsk State Technical University, Kamianske, Dnipro, Ukraine

## STRESS STATE OF BELT IN POWERFUL CONVEYOR WITH BREAKAGES OF CABLE GROUPS

**Мета.** Розробка алгоритму визначення напруженого стану конвеєрної стрічки з розривами групи тросів.

**Методика.** Побудова, розв'язання методами механіки шаруватих композитних матеріалів моделі напружено-деформованого стану конвеєрної стрічки з розривами групи тросів.

**Результати.** Розроблено алгоритм розрахунку напружено-деформованого стану конвеєрної гумотросової стрічки довільної конструкції з групою ушкоджених тросів. Встановлено, що розрив тросів в одному перерізі призводить до виникнення в стрічці максимальних напружень. Такий розрив найнебезпечніший для випадку розривів тих самих тросів, але в різних перерізах. Взаємний зсув перерізів тросів вздовж гумотросової стрічки конвеєра зменшує вплив порушення нерозривності тросів на її напружено-деформований стан. Максимальні сили розтягу тросів та дотичні напруження в гумі виникають в перерізі розриву неперервності тросів. Максимальні сили виникають в суміжних з ушкодженим тросом, максимальні дотичні – в гумових прошарках, суміжних з ушкодженим тросом.

**Наукова новизна.** Встановлено характер впливу розташування цілих тросів поміж ушкодженими на максимальні сили розтягу тросів та дотичні напруження в гумових прошарках між тросами.

**Практична значущість.** Визначений напружено-деформований стан гумотросової стрічки з ушкодженими тросами дозволяє об'єктивно визначати реальну втрату стрічкою тягової спроможності та обґрунтовано призначати умови експлуатації стрічки, включно і її відновлювального ремонту. Обґрунтовано встановлені умови експлуатації, включно і розроблені технічні рішення по її ремонту, дозволяють забезпечувати ефективність експлуатації стрічки протягом її життєвого циклу відповідно до сучасних вимог CALS-технологій.

**Ключові слова:** напружено-деформований стан, стрічка потужного конвеєра, розрив групи тросів, алгоритм розрахунку, канат довільної конструкції, тягова спроможність, умови експлуатації.

**Вступ.** Гумотросові конвеєрні стрічки широко застосовуються в транспортному машинобудуванні. Вони передають зусилля розтягу. Їх використовують на потужних конвеєрах. Вони мають систему тросів, регулярно розташованих в одній площині вздовж її подовжньої осі. Конструктивну єдність тросів забезпечує еластична оболонка.

В процесі експлуатації тягові елементи руйнуються. Руйнування має випадковий характер. Зруйнуватися може і група тросів. Це призводить до перерозподілу навантажень поміж тросами, виникнення дотичних напружень в оболонці стрічки – ускладнення напружено-деформованого стану та зменшує тягову спроможність стрічки. Зменшення тягової спроможності стрічки може призвести до нестандартних ситуацій, включно і до виробничого травматизму.

**Аналіз стану питання та постановка задачі дослідження.** Вплив розривів неперервності тросів на міцність, надійність гумотросових стрічок, розглянуто в ряді робіт [1–9]. Випадок визначення напружено-деформованого стану стрічки з розривами неперервності груп тросів не розглядався, алгоритм розрахунку також не розроблено. Тому розробка алгоритму розрахунку напружено-деформованого стану конвеєрної гумотросової стрічки довільної конструкції з групою ушкоджених тросів – *актуальна науково-технічна задача*.

Розробимо алгоритм розрахунку розподілу сил натягнення тросів та дотичних напружень в гумі конвеєрної стрічки для найбільш небезпечного випадку – ушкодження декількох тросів в одному перерізі.

**Результати.** Розглянемо гумотросову стрічку конвеєра як шарувату конструкцію з м'якими та жорсткими шарами, що двома протилежними краями приєднана до конструктивних елементів конвеєра – барабанів. Розрив групи тросів відбувся в перерізі, який відстоїть від одного барабана на відстані  $l_1$ . Від іншого – на відстані  $l_2$ . Стрічка має  $M$  тросів, навантажена силою розтягу  $P$ .

Переміщення тросів в стрічці незмінної конструкції визначимо за залежністю [9]. Вона була отримана з умови рівноваги тросів у стрічці

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

де  $u(i, x)$  – переміщення  $i$ -того троса ( $1 \leq i \leq M$ ) в перерізі  $x$ ;  $A_n$ ,  $B_n$ ,  $c$  – невідомі сталі;  $\mu_n = \frac{\pi n}{M}$ ;  $\beta_n$  – вектор характеристичних показників,

$$\beta_n = \sqrt{\frac{2 G k_G}{(t-d) E F} (1 - \cos(\mu_n (i - 0,5)))}; \quad d, t - \text{діаметр та крок укладення тросів}$$

в стрічці, відповідно,  $G$  – модуль зсуву матеріалу еластичної оболонки стрічки;  $EF$  – приведена жорсткість троса (елемента армування) на розтяг;  $k_G$  – коефіцієнт, що враховує вплив форми матеріалу еластичної оболонки розташованої поміж тросами (елементами армування).

Порушення цілісності тросів призводить до порушення структури стрічки. Воно унеможливорює використання залежності (1). Скористаємося методом перерізів. Перерізом розташування обривів тросів розріжемо стрічку на дві частини. Залежність (1) прийнятна для кожної з частин. Частинам стрічки надамо номери 1 та 2. Номери помістимо у індекси величин, що відносяться до першої та другої частини стрічки. Початок осі  $x$  сумістимо з перерізом розривів тросів.

Характер взаємодії стрічки та барабанів визначається їхньою формою, оріє-

нтацією відносно стрічки та іншим. Характер цієї взаємодії задамо кінематичними граничними умовами в довільній формі

$$f_{\rho}(i) = \sum_{n=1}^M F_{\rho,n} \cos(\mu_n(i-0,5)), \quad (2)$$

де  $\rho = 1, 2$  – номер частини.

Прирівняємо (2) деформаціям (1) кінців частин стрічки (в перерізах приєднання до барабанів). Отримаємо вирази переміщень та навантажень тросів частин стрічки

$$u_1(i, x) = \sum_{n=1}^{M-1} \left( F_{1,n} e^{\beta_n(x+l_1)} + B_{1,n} \left( e^{-\beta_n x} - e^{\beta_n(x+2l_1)} \right) \right) \cos(\mu_n(i-0,5)) + \frac{P x}{M E F} + c_1, \quad (3)$$

$$u_2(i, x) = \sum_{n=1}^{M-1} \left( F_{2,n} e^{\beta_n(x-l_2)} + B_{2,n} \left( e^{-\beta_n x} - e^{\beta_n(x-2l_2)} \right) \right) \cos(\mu_n(i-0,5)) + \frac{P x}{M E F} + c_2, \quad (4)$$

$$p_1(i, x) = E F \sum_{n=1}^{M-1} \left( F_{1,n} e^{\beta_n(x+l_1)} - B_{1,n} \left( e^{-\beta_n x} + e^{\beta_n(x+2l_1)} \right) \right) \beta_n \cos(\mu_n(i-0,5)) + \frac{P}{M}, \quad (5)$$

$$p_2(i, x) = E F \sum_{n=1}^{M-1} \left( F_{2,n} e^{\beta_n(x-l_2)} - B_{2,n} \left( e^{-\beta_n x} + e^{\beta_n(x-2l_2)} \right) \right) \beta_n \cos(\mu_n(i-0,5)) + \frac{P}{M}. \quad (6)$$

Ушкодження тросів призводить до утворення зазорів поміж кінцями ушкоджених тросів. Розглядатимемо значення зазорів як множину чисел  $U$  множини номерів тросів  $J$ . Обидві частини належать єдиній стрічці. Взаємодія частин характерна і тим, що різниця переміщень тросів частин дорівнює нулю, якщо номер троса  $i$  не належить множині  $J$ . Внутрішні сили навантаження тросів рівні – їхня різниця дорівнює нулю. Окрім того, сили навантаження кінців ушкоджених тросів дорівнюють нулю. Таким чином,

коли 
$$x = 0 \quad u_{1,i} - u_{2,i} = \begin{cases} U_j & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} (j \in J), \quad (7)$$

$$p_{1,i} - p_{2,i} = 0 \wedge p_{1,i} = p_{2,i} = 0 (i = J). \quad (8)$$

Умову (7) запишемо з використанням функції Ері на обмеженій осі дискретних номерів тросів

$$u_{1,i} - u_{2,i} = \frac{2}{M} \sum_n^{M-1} \sum_{j \in J} U_j \cos(\mu_n(j-0,5)) \cos(\mu_n(i-0,5)) + \frac{1}{M} \sum_{j \in J} U_j. \quad (9)$$

Підставимо у (9) значення переміщень (3), (4). Отримаємо співвідношення векторів коефіцієнтів виразів (3) – (6)

$$B_{1,n} = \frac{\sum_{j \in J} \frac{2}{M} U_j \cos(\mu_n(j-0,5)) + F_{2,n} e^{-\beta_n l_2} - F_{1,n} e^{\beta_n l_1} + B_{2,n} (1 - e^{-2\beta_n l_2})}{(1 - e^{2\beta_n l_1})}, \quad (10)$$

$$c_1 - c_2 = \frac{1}{M} \sum_{j \in J} U_j. \quad (11)$$

Врахуємо, що коефіцієнти  $c_1$  та  $c_2$  визначають переміщення частин стрічки як жорсткого тіла. Прийmemo  $c_2 = 0$ .

З першої складової граничної умови (8) знайдемо ще одне співвідношення векторів коефіцієнтів виразів (3) – (6). Врахуємо (10). Отримаємо

$$B_{2,n} = \frac{\frac{2}{M} \sum_{j \in J} U_j \cos(\mu_n(j-0,5)) \chi_n + (1 + \chi_n) (F_{2,n} e^{-\beta_n l_2} - F_{1,n} e^{\beta_n l_1})}{1 + e^{-2\beta_n l_2} - (1 - e^{-2\beta_n l_2}) \chi_n}, \quad (12)$$

$$\text{де } \chi_n = \frac{1 + e^{2\beta_n l_1}}{1 - e^{2\beta_n l_1}}.$$

Підставимо значення вектора коефіцієнтів (12) у вираз (6) розподілу внутрішніх сил натягнення тросів стрічки. Згідно другої складової граничних умов, прирівняємо сили натягнення тросів другої частини в перерізі їхнього розриву ( $x = 0$ ) нулю. Отримаємо систему алгебраїчних рівнянь. Порядок системи відповідає кількості ушкоджених тросів

$$\begin{aligned} \frac{2}{M} U_j \sum_{n=1}^{M-1} \frac{\cos^2(\mu_n(j-0,5)) \chi_n}{1 + e^{-2\beta_n l_2} - (1 - e^{-2\beta_n l_2}) \chi_n} (1 + e^{-2\beta_n l_2}) \beta_n = \frac{P}{M E F} + \\ + \sum_{n=1}^{M-1} \left( F_{2,n} e^{-\beta_n l_2} + \frac{(1 + \chi_n) (F_{2,n} e^{-\beta_n l_2} - F_{1,n} e^{\beta_n l_1})}{1 + e^{-2\beta_n l_2} - (1 - e^{-2\beta_n l_2}) \chi_n} (1 + e^{-2\beta_n l_2}) \right) \beta_n \cos(\mu_n(j-0,5)), \\ j \in J. \end{aligned}$$

Рішенням системи є вектор  $U$  невідомих величин зазорів між кінцями тросів з ушкодженнями. Відомий вектор  $U$  зазорів, вирази (10) – (12) дозволяють визначити переміщення та навантаження тросів (3) – (6).

Відомі розподіли переміщень тросів дозволяють за законом Гука визначити усереднені дотичні напруження, що виникають в гумових прошарках, розташованих між тросами та можуть призводити до відшарування гуми від тросів, відповідно, до проникнення вологи до тросів

$$\tau_\rho = G \frac{u_{\rho,i+1} - u_{\rho,i}}{t - d}.$$

Аналіз отриманих виразів дозволив встановити, що розрив тросів в одному перерізі призводить до виникнення в стрічці максимальних напружень. Такий розрив найнебезпечніший для випадку розривів тих самих тросів, але в різних перерізах. Взаємний зсув перерізів тросів вздовж гумотросової стрічки конвеєра зменшує вплив порушення нерозривності тросів на її напружено-деформований стан. Максимальні сили розтягу тросів та дотичні напруження в гумі виникають в перерізі розриву неперервності тросів. Максимальні сили виникають в суміж-

них з ушкодженим тросом, максимальні дотичні – в гумових прошарках, суміжних з ушкодженим тросом.

Наявність цілого троса поміж ушкодженими суттєво зменшує екстремальні навантаження тросів та дотичні напруження в гумі. Збільшення кількості цілих тросів поміж ушкодженими зменшує максимальні сили навантаження тросів та дотичні напруження в гумі. Залежність має спадний характер.

**Висновки.** Отримана послідовність визначення сил натягнення тросів та дотичних напружень в гумовій оболонці стрічки є шуканим алгоритмом розрахунку напружено-деформованого стану конвеєрної стрічки з ушкодженими в одному перерізі конвеєрної стрічки тросами довільного розташування та кількості. Застосування алгоритму дозволить обґрунтовано визначити умови експлуатації, включно і її ремонту, за допомогою розробленого методу з частковим відновленням тягової спроможності [10] та, відповідно до CALS-технологій, створювати умови, спрямовані на забезпечення ефективності експлуатації стрічки конвеєра протягом її життєвого циклу.

Подальшим напрямом досліджень в розв'язанні задачі підвищення ефективності експлуатації гумотросових стрічок, на нашу думку, має бути дослідження, спрямоване на застосування в гумотросових конвеєрних стрічках тросів меншого діаметра з більш високою міцністю на розрив та більш високими показниками міцності адгезійного з'єднання тросів з еластичною оболонкою стрічки. Розв'язання такої задачі дозволить зменшити масу стрічки та діаметри барабанів конвеєра.

#### Перелік посилань

1. 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. <https://farplss.org/index.php/journal/article/view/336/305>
2. Bel'mas, I.V. (1993). Stress state of rubber-rope tapes during their random damages. *Problemy Prochnosti i Nadezhnos'ti Mashin*, 6, 45-48.
3. Бельмас, І.В. (2017). Напружено-деформований стан плоского каната зумовлений поривами тягових елементів та конструкцією барабана підйомної машини, *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*, 50, 163-170. <http://znp.nmu.org.ua/pdf/2017/50.pdf>
4. Волоховский, В.Ю. (2010). Концентрация усилий в тросах и несущая способность резино-тросовых конвейерных лент с повреждениями, *Вестник МЭИ*, 5, 5-12.
5. Ропай, В.А. (2016). *Шахтные уравновешивающие канаты: монография*. Национальный горный университет.
6. 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.*
7. Song, W., Shang, W., & Li, X. (2009). Finite element analysis of steel cord conveyor belt splice. In *International Technology and Innovation Conference*.
8. Прушак, В.Я. (2008). Численная оценка долговечности соединений резиновых конвейерных лент. *Вестник БНТУ*, 1, 35-38.
9. Бельмас, І.В., Колосов, Д.Л., Самуся, В.І., Білоус, О.І., & Бобильова, І.Т. (2018). Напружено-деформований стан плоского тяговонесучого органа підйомно-транспортної машини з урахуванням впливу комплексу чинників. *Збірник наукових праць національного*

*гірничого університету, 55, 213-221.*

10. Бельмас, І.В., Колосов, Д.Л., Онищенко, С.В., & Бобильова, І.Т. (2020). Часткове відновлення тягової здатності гумотросового тягового елемента з пошкодженою тросовою основою. *Збірник наукових праць національного гірничого університету, 60, 196-206.*  
<https://doi.org/10.33271/crpnmu/60.196>

### АННОТАЦІЯ

**Цель.** Разработка алгоритма определения напряженного состояния конвейерной ленты с разрывами группы тросов.

**Методика.** Построение, решение методами механики слоистых композитных материалов модели напряженно-деформированного состояния конвейерной ленты с разрывами группы тросов.

**Результаты.** Разработан алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния конвейерной резинотросовой ленты произвольной конструкции с группой поврежденных тросов. Установлено, что разрыв тросов в одном сечении приводит к возникновению в ленте максимальных напряжений. Такой разрыв наиболее опасен для случая разрывов одних и тех же тросов, но в разных сечениях. Взаимное смещение сечений тросов вдоль резинотросовой ленты конвейера уменьшает влияние нарушения неразрывности тросов на ее напряженно-деформированное состояние. Максимальные силы растяжения тросов и касательные напряжения в резине возникают в сечении разрыва непрерывности тросов. Максимальные силы возникают в тросах, смежных с поврежденным, максимальные касательные – в резиновых прослойках, смежных с поврежденным тросом.

**Научная новизна.** Установлен характер влияния расположения целых тросов между поврежденными на максимальные силы растяжения тросов и касательные напряжения в резиновых прослойках.

**Практическое значение.** Определенное напряженно-деформированное состояние резинотросовой ленты с поврежденными тросами позволяет объективно определять реальную потерю лентой тяговой способности и обоснованно назначать условия эксплуатации ленты, включительно и ее восстановительный ремонт. Обоснованно установленные условия эксплуатации, включительно и разработанные технические решения по ее ремонту, позволяют обеспечивать эффективность эксплуатации ленты на протяжении ее жизненного цикла в соответствии с современными требованиями CALS-технологий.

**Ключевые слова:** *напряженно-деформированное состояние, лента мощного конвейера, разрыв группы тросов, алгоритм расчета, канат произвольной конструкции, тяговая способность, условия эксплуатации.*

### ABSTRACT

**Purpose.** Development of an algorithm for determining a stress state of a conveyor belt with breakages of a group of cables.

**Methodology.** Construction, solution of a model of a stress-strain state of a conveyor belt with breakages of a group of cables using methods of mechanics of layered composite materials.

**Results.** Algorithm for calculating a stress-strain state of a conveyor belt of arbitrary structure with a group of broken cables is developed. It is established that the breakage of cables in one cross-section leads to occurrence of maximum stresses in a belt. Such a breakage is the most dangerous for a case

of breakages in the same cable, but in different cross-sections. The mutual displacement of cable cross-sections along the conveyor belt reduces the influence of violating the continuity of cables on its stress-strain state. The maximum tensile forces in cables and tangential stresses in the rubber occur in a cross-section of discontinuity of cables. The maximum forces occur in cables adjacent to the broken one. The maximum tangential stresses occur in the rubber layers adjacent to the broken cable.

**Scientific novelty.** A character of influence of location of unbroken cables between the broken ones on the maximum tensile forces in cables and tangent stresses in rubber layer between cables is established.

**Practical significance.** The determined stress-strain state of a rubber-cable rope with broken cables allows objective determination of a real loss of rope tractive ability and reasonable formulation of rope operating conditions, including rope repairs. The established operating conditions, including developed technical solutions regarding its repairs, allow providing the efficiency of rope operation during its life cycle according to modern requirements of CALS-technologies.

**Keywords:** *stress-strain state, belt in powerful conveyor, cable groups breakages, calculation algorithm, arbitrary rope structure, tractive ability, operating conditions.*