

© Д.Л. Колосов¹, В.І. Самуся¹, Г.І. Танцура², О.І. Білоус², О.М. Воробйова¹

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

² Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське, Україна

ВПЛИВ НЕЛІНІЙНОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ ТРОСІВ ГУМОТРОСОВОГО КАНАТА НА ЙОГО НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН

© D. Kolosov¹, V. Samusia¹, H. Tantsura², O. Bilous², O. Vorobiova¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

² Dniprovsk State Technical University, Kamianske, Ukraine

INFLUENCE OF DEFORMATION NON-LINEARITY OF CABLES ON ROPE STRESSED-STRAIN STATE

Мета. Встановлення впливу нелінійного деформування тросів на напружено-деформований стан підйомного гумотросового каната з розривом троса.

Методика. Побудова та розв'язання моделі взаємодії тросів гумотросового каната методами механіки композитних матеріалів для випадку взаємодії жорстких на розтяг шарів з шарами, що сприймають лише напруження зсуву.

Результати. Встановлено закономірності напружено-деформованого стану стандартного зразка залежно від нелінійного деформування тросів гумотросового каната з розривом троса. Доведено, що нелінійність деформування більше впливає на перерозподіл сил при розриві крайнього троса – максимальні сили зменшуються на 15%, тоді як у разі розриву середнього троса зміни не перевищують 2%. Вказане є наслідком менших максимальних сил навантаження тросів, суміжних з ушкодженим, та меншим розміром ділянок дії зусиль, що перевищують рівень лінійного деформування тросів. Використання класичних методів механіки композитних матеріалів в побудові математичної моделі взаємодії тросів в канаті, аналітичне розв'язання моделі дозволяє вважати отримані результати достатньо достовірними.

Наукова новизна. Встановлено характер впливу нелінійного деформування тросів на напружено-деформований стан підйомного каната з розривом троса.

Практична значущість. Урахування нелінійного закону деформування тросів дозволяє уточнити значення навантажень, що діють на тяговий орган підйомної установки та збільшити довговічність каната й знизити ризики відмов підйомних установок. Можливість отримання більш точних значень втрати тягової спроможності канатом підвищує рівень безпеки використання гумотросових канатів.

Ключові слова: напружено-деформований стан, композитний тяговий орган, нелінійне деформування тросів, канат з розривом троса, тягова спроможність, безпека використання канатів.

Вступ. Канати підйомних машин, зокрема їхній напружений стан, суттєво впливають на роботу та безпеку використання підйомних машин. Останній залежить від властивостей тросів, включно і тросів гумотросових канатів. Зазвичай, деформації твердих тіл не пропорційні силам, що на них діють. Зростання відносних деформацій випереджає зростання напружень. Не винятком є і троси

плоского гумотросового каната. Більш того, виготовлення тросів пов'язано зі скручуванням троса з окремих стренг. В свою чергу, стренги скручені з дротів. Наслідком такої технології витягнення тросів є пластичне видовження тросів на початкових стадіях його експлуатації.

Залишкові деформації тросів близькі між собою через те, що близькі сили, які діють на троси. Близькість деформацій (видовження каната) не впливає на перерозподіл сил. На нього більше впливають інші чинники, наприклад, відомі залишкові деформації конвеєрних гумотросових стрічок, знятих з конвеєра.

Аналіз стану питання та постановка задачі дослідження. В роботі [1] проведено аналіз та визначено основні напрями досліджень та проектних робіт в галузі підйому руд зі значних глибин. До них віднесено: підвищення ефективності експлуатації сталевих канатів; виявлення і усунення додаткових навантажень на тяговий орган підйомної установки з метою збільшення довговічності каната; розробка нових схем систем підйому; розробка нових засобів контролю підйомної системи і основних вузлів; зниження ризику відмов підйомних установок. Питання впливу зміни в часі механічних властивостей гуми на напружений стан гумотросового тягового органа з ушкодженим тросом розглянуто в роботі [2]. Оскільки напружений стан каната, включно і його залежність від дійсного значення модуля пружності тросів, суттєво впливає на його тягову спроможність, встановлення нелінійної залежності деформування тросів від напружень в канаті – *актуальна науково-технічна задача*. Її розв'язання дозволить виявити і уточнити значення навантажень, що діють на тяговий орган підйомної установки та збільшити довговічність каната та знизити ризику відмов підйомних установок.

Результати. Визначимо вплив нелінійності деформування тросів на його напружено-деформований стан на прикладі гумотросового каната з ушкодженням тросом. В межах лінійного закону деформування визначимо напружено-деформований стан плоского гумотросового каната, який має M тросів. До нього додамо напружений стан плоского гумотросового каната, викликаний лише відмінними відносними деформаціями тросів, навантажених силами, що призвели до нелінійного їх деформування.

Вздовж каната проведемо вісь x . Початок осі сумістимо з перерізом розриву троса. Канат будемо вважати безмежно довгим. Його напружено-деформований стан залежить від характеру взаємодії тросів в канаті [1] та від граничних умов, які в розглянутому випадку мають наступний вигляд

$$\text{Коли } x = 0, \quad u_i = U_0 \begin{cases} 0 & i \neq I \\ 1 & i = I \end{cases} \quad (1)$$

де U_0 – зміщення кінця ушкодженого троса в перерізі $x = 0$.

$$\text{Коли } x = 0, \quad p_I = 0. \quad (2)$$

$$\text{Якщо } x \rightarrow \infty \quad u_{i-1} = u_i. \quad (3)$$

З останньої умови приймемо вирази переміщень тросів [3] в наступних формах

$$u_i = \sum_{m=1}^{M-1} B_m e^{-\beta_m x} \cos(\mu_m (i-0,5)) + \frac{P x}{E F} + \delta, \quad (4)$$

де B_m, δ – невідомі сталі коефіцієнти; $\mu_m = \frac{\pi m}{M}$; $\beta_m = \sqrt{\frac{2 G b k_G}{(t-d) E F} (1 - \cos \mu_m)}$;

u_i – переміщення i – того троса вздовж каната (осі x); G, k_G – модуль зсуву та коефіцієнт форми матеріалу еластичних прошарків, відповідно; E, F – приведені модуль пружності на розтяг та площа перерізу троса, відповідно; b – товщина каната; t – крок укладання тросів у канаті; d – діаметр тросів, з яких виготовлено канат: P – сила навантаження троса, що припадає на один трос каната.

Розподіл сил між тросами за законом Гука знайдемо з виразу (4)

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

Граничну умову (1) запишемо як ряд Фур'є, врахувавши що вираз (4) включає складання косинусів

$$u_i = U_0 \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M-1} \cos(\mu_m (I-0,5)) \cos(\mu_m (i-0,5)) + \frac{U_0}{2M}. \quad (6)$$

Порівняємо (6) та (4) для випадку $x = 0$.

$$u_i = \sum_{m=1}^{M-1} B_m \cos(\mu_m (i-0,5)) + \delta = U_0 \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M-1} \cos(\mu_m (I-0,5)) \cos(\mu_m (i-0,5)) + \frac{U_0}{2M}. \quad (7)$$

З рівності (7) визначимо значення невідомих сталих через одну невідому величину

$$B_m = \frac{U_0}{M} \cos(\mu_m (I-0,5)), \quad (8)$$

$$\delta = \frac{U_0}{2M}. \quad (9)$$

Підставимо значення невідомих сталих (8) у (5). Знайдемо величину зазору між кінцями ушкодженого троса

$$U_0 = \frac{M P}{E F \sum_{m=1}^{M-1} \cos^2(\mu_m (I-0,5)) \beta_m}. \quad (10)$$

За отриманими залежностями розраховали показники напружено-деформованого стану гумотросового тягового органа типу ГТС–3150. Кількість тросів прийняли рівною семи (рис. 1).

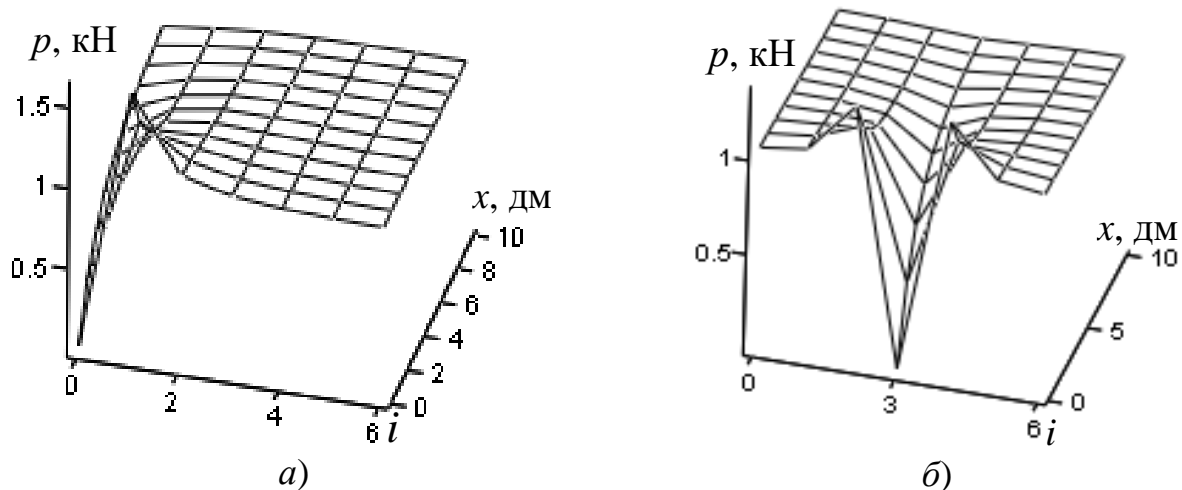


Рис. 1. Розподіл внутрішніх сил навантаження тросів i вздовж осі x конвеєрної стрічки типу ГТС–3150 з uszkodженням: а) крайнім (першим) тросом, б) середнім (четвертим) тросом

Відповідно до рисунку, навантаження тросів, суміжних з uszkodженням тросом відмінні від навантажень інших тросів. Більша відмінність спостерігається в перерізі uszkodження троса. Будемо вважати, що в цих тросах має місце відхилення закономірності деформування тросів від лінійного закону. Визначимо вплив відхилення закону деформування від лінійного. Для цього визначимо напружено-деформований стан каната, в якому частини найбільш навантажених тросів деформуються на величини, що не враховані в лінійній постановці. Граничні умови (1) – (3) в такій задачі залишаються незмінними.

Переміщення та розподіли внутрішніх сил навантаження тросів [3] подамо у наступних формах

$$u_i = \sum_{m=1}^{M-1} \left(A_m e^{\beta_m x} + B_m e^{-\beta_m x} \right) \cos(\mu_m (i - 0,5)) + \delta, \quad (11)$$

$$p_i = -E F \sum_{m=1}^{M-1} \left(A_m e^{\beta_m x} - B_m e^{-\beta_m x} \right) \beta_m \cos(\mu_m (i - 0,5)), \quad (12)$$

де A_m – невідомі сталі коефіцієнти.

Скористаємося виразом (6). Сформулюємо наступні співвідношення між сталими величинами

$$A_m = \frac{2U_0}{M e^{\beta_m l}} \cos(\mu_m (I - 0,5)) - B_m e^{-2\beta_m l}, \quad (13)$$

$$\delta = \frac{U_0}{M}, \quad (14)$$

$$U_0 = \frac{2 \sum_{m=1}^{M-1} B_m \beta_m \cos(\mu_m (I - 0,5))}{\sum_{m=1}^{M-1} \beta_m \cos^2(\mu_m (I - 0,5))}. \quad (15)$$

Звернемо увагу на те, що вирази (11) та (12) не мають складової, залежної від зовнішнього навантаження. Довжину цієї ділянки позначимо l . Вище ми прийняли, що канат безмежно довгий. Врахуємо це та доповнимо канат безмежно довгою частиною.

Частинам надамо номери 1, 2. В першій частині є троси, навантаження яких в лінійній постановці не менше за навантаження, що призводить до нелінійного їх деформування – $K_{кр}$.

Нелінійне деформування тросів відбувається за рахунок зростання їхніх деформацій без збільшення сил, що на них діють. Прийmemo модуль жорсткості троса на розтяг кусочно лінійним. Точка зламу модуля пружності відповідає точці навантаження троса силою $K_{кр}$. На підставі вказаного, доповнимо вираз переміщень (11) додатковою складовою. Врахуємо номер частини в позначеннях величин, що до неї відносяться, та співвідношення невідомих сталих (13) та (14)

$$u_{i,1} = \sum_{m=1}^{M-1} \left(B_{m,1} \left(e^{-\beta_m x} - e^{\beta_m x} \right) + \frac{2}{M} U_0 \cos(\mu_m (I - 0,5)) e^{\beta_m x} + k_m x \right) \times \cos(\mu_m (i - 0,5)) + \frac{U_0}{M} + k_0 x, \quad (16)$$

де $k_m = \frac{2 \eta}{M E F} \sum_{j=1}^M \begin{cases} \int_0^l p_1(j, l) & (p_1(j, l) \leq K_{кр}) \\ 0 & (p_1(j, l) < K_{кр}) \end{cases} \cos(\mu_m (j - 0,5))$; η – коефіцієнт,

що враховує відмінність кута нахилу модуля пружності від лінійного E .

Вираз розподілу сил (12) першої частини залишається незмінним, оскільки ми враховуємо вплив лише додаткових переміщень тросів, викликаних їхнім нелінійним деформуванням. Переміщення та внутрішні сили навантаження тросів другої частини запишемо в наступній формі

$$u_{i,2} = \sum_{m=1}^{M-1} B_{m,2} e^{-\beta_m x} \cos(\mu_m (i - 0,5)), \quad (17)$$

$$p_{i,2} = -E F \sum_{m=1}^{M-1} B_{m,2} e^{-\beta_m x} \beta_m \cos(\mu_m (i - 0,5)). \quad (18)$$

На границі частин $x = l$ мають виконуватися умови сумісності та нерозривності деформацій

$$p_{i,1} = p_{i,2}, \quad (19)$$

$$u_{i,1} = u_{i,2}. \quad (20)$$

З умови рівності сил навантаження тросів (13) в перерізі $x = l$, з урахуванням виразу (9) знайдемо співвідношення невідомих сталих

$$B_{m,2} = B_{m,1} \left(1 + e^{2\beta_m l} \right) - \frac{2 \sum_{n=1}^{M-1} B_{n,1} \beta_n \cos(\mu_n (I - 0,5))}{\sum_{n=1}^{M-1} \beta_n \cos^2(\mu_n (I - 0,5))} \cos(\mu_m (I - 0,5)) e^{2\beta_m l}. \quad (21)$$

Скористаємося умовою рівності переміщень (20). Складемо систему алгебраїчних рівнянь нерозривності (рівності переміщень) тросів обох частин. Порядок системи $M-1$. Розв'язком системи є вектор невідомих сталих $B_{m,1}$. Розв'язок задачі вимагає вибору довжини першої частини каната l методом наступних наближень.

Значення елементів вектору $B_{m,1}$ та вектору $B_{m,2}$ (21), невідомої величини U_0 з виразу (15) дозволяють визначати параметри напружено-деформованого стану плоского гумотросового каната.

Нами, як і вище, вони розраховані для каната типу ГТК-3150 з ушкодженим крайнім та середнім тросом. В розрахунках $K_{кр}$ прийняли рівним 1,2, η – коефіцієнт, що враховує відмінність кута нахилу модуля пружності від лінійного на інтервалі $0 \leq x \leq l$ прийняли рівним одиниці. Значення l вибирали з умови, що в перерізі $x = l$ навантаження тросів, суміжних з ушкодженим, дорівнювало 1,2 (рис. 2).

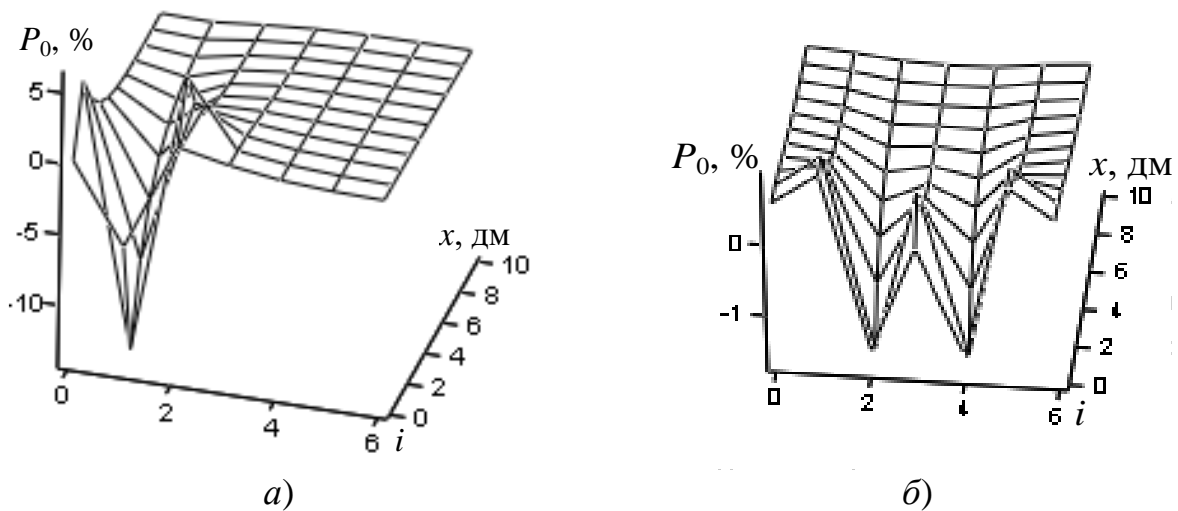


Рис. 2. Розподіл відносних змін внутрішніх сил навантаження тросів i вздовж осі x каната типу ГТК-3150 з ушкодженням: а) крайнім (першим) тросом, б) середнім (четвертим) тросом

При розриві крайнього троса (рис. 1) l становило 179,8 мм, при розриві середнього – 82,1 мм. Наведені графічні залежності свідчать про те, що нелінійність деформування більше впливає на перерозподіл сил при розриві крайнього троса – максимальні сили (рис. 1) зменшуються на 15%, тоді як у разі розриву середнього троса вони не перевищують 2%. Вказане є наслідком менших

максимальних сил навантаження тросів, суміжних з ушкодженням, та меншим розміром ділянок дії зусиль, що перевищують рівень лінійного деформування тросів. Таким чином, нелінійне деформування суттєво (на 15%) зменшує максимальні навантаження тросів в канаті з ушкодженням крайнім тросом.

Нами розглянуто практично крайні випадки – максимального та мінімального впливу розривів, відповідно, крайнього та середнього троса каната. Ці випадки мають спільну особливість – в них має місце або один трос, навантаження якого суттєво відрізняється від інших, або два троси максимально навантажених рівними силами. Це дозволило поділити канат на дві частини. В інших випадках канат треба було ділити на три частини. Принцип розв’язання задачі залишився незмінним. Ускладнювалося би його викладення.

Висновки. Урахування нелінійного закону деформування тросів дозволяє уточнити значення навантажень, що діють на тяговий орган підйомної установки та збільшити довговічність каната й знизити ризики відмов підйомних установок. Використання класичних методів механіки композитних матеріалів в побудові математичної моделі взаємодії тросів в канаті, аналітичне розв’язання моделі дозволяє вважати отримані результати достатньо достовірними. В подальших дослідженнях доцільно розглянути питання впливу нелінійного деформування тросів каната, зумовленого конструктивними параметрами підйомної машини та їхніми змінами в процесі експлуатації.

Перелік посилань

1. Перекутнев, В.Е., & Зотов, В.В. (2020). Сравнительная оценка резиновых канатов для рудничных вертикальных подъемных установок, *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 7, 85–93.
<https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-7-0-85-93>
2. 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 ушкодженням тросом. *Збірник наукових праць національного гірничого університету*, 61, 149-155.
<https://doi.org/10.33271/crpnmu/62.149>
3. Belmas, I., Kogut, P., Kolosov, D., Samusia, V., & Onyshchenko, S. (2019). Rigidity of elastic shell of rubber-cable belt during displacement of cables relatively to drum. *International Conference Essays of Mining Science and Practice*, 109, 00005.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900005>

АННОТАЦІЯ

Цель. Установление влияния нелинейного деформирования тросов на напряженно-деформированное состояние подъемного резиновых каната с разрывом троса.

Методика. Построение и решение модели взаимодействия тросов резиновых каната методами механики композитных материалов для случая взаимодействия жестких на растяжение слоев со слоями, воспринимающими только напряжения сдвига.

Результаты. Установлены закономерности напряженно-деформированного состояния стандартного образца в зависимости от нелинейного деформирования тросов резиновых каната с разрывом троса. Доказано, что нелинейность деформирования больше влияет на перераспределение сил при разрыве крайнего троса – максимальные силы уменьшаются на 15%,

тогда как в случае разрыва среднего троса изменения не превышают 2%. Указанное является следствием меньших максимальных сил нагрузки тросов, смежных с поврежденным, и меньшим размером участков действия усилий, превышающих уровень линейного деформирования тросов. Использование классических методов механики композитных материалов при построении математической модели взаимодействия тросов в канате, и аналитическое решение модели позволяет считать полученные результаты достаточно достоверными.

Научная новизна. Установлен характер влияния нелинейного деформирования тросов на напряженно-деформированное состояние подъемного каната с разрывом троса.

Практическое значение. Учет нелинейного закона деформирования тросов позволяет уточнить значение нагрузок, действующих на тяговый орган подъемной установки, увеличить долговечность каната и снизить риски отказов подъемных установок. Возможность получения более точных значений потери тяговой способности канатом повышает уровень безопасности использования резинотросовых канатов.

Ключевые слова: *напряженно-деформированное состояние, композитный тяговый орган, нелинейное деформирование тросов, канат с разрывом троса, тяговая способность, безопасность использования канатов.*

ABSTRACT

Purpose. Establishment of influence of non-linear deformation of cables on a stress-strain state of a hoisting rubber-cable rope with cable breakage.

Methodology. Construction and solution of a model of interaction of cables in a rubber-cable rope for a case of interaction of layers rigid to tension with layers that are only under shear stress using the methods of mechanics of composite materials.

Results. The character of dependency of a stress-strain state of a standard sample on a non-linear deformation of cables in a rubber-cable rope with cable breakage is established. It is proven that the non-linearity of deformation has a greater influence on redistribution of forces for a rupture of the extreme cable – the maximum forces are reduced by 15%, while in a case of rupture of the middle cable the changes do not exceed 2%. This is due to the lower maximum loading forces on cables adjacent to the broken one, and the smaller size of areas where forces exceed the level of linear deformation of cables. The use of classical methods of mechanics of composite materials in the construction of a mathematical model of interaction of cables in the rope, and the analytical solution of a model allows considering the results sufficiently reliable.

Scientific novelty. The character of influence of non-linear deformation of cables on a stress-strain state of a hoisting rope with cable breakage is established.

Practical significance. Considering the non-linear law of deformation of cables allows specifying the values of loads acting on a tractive element of a hoisting installation and increasing the durability of rope, and reducing the risk of failure of hoisting installations. A possibility to obtain more accurate values of tractive ability loss by the rope increases the level of operational safety of rubber-cable ropes.

Keywords: *stress-strain state, composite tractive element, non-linear cable deformation, rope with cable breakage, tractive ability, rope operation safety.*