УДК 622.673:539.4 https://doi.org/10.33271/crpnmu/73.104

© І.В. Бельмас[1], Д.Л. Колосов[2], С.В. Онищенко[2],
О.І. Білоус[1], Г.І. Танцура[1], П.В. Черниш[2]
[1] Дніпровський державний технічний університет, Кам’янське, Україна
[2] Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

НАПРУЖЕНИЙ СТАН ГУМОТРОСОВОГО ТЯГОВОГО ОРГАНА ПОРУШЕНОЇ СТРУКТУРИ З УРАХУВАННЯМ НЕЛІНІЙНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ ГУМОВОЇ ОБОЛОНКИ

© I. Belmas[1], D. Kolosov[2], S. Onyshchenko[2],
O. Bilous[1], H. Tantsura[1], P. Chernysh[2]
[1] Dniprovsk State Technical University, Kamianske, Ukraine
[2] Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

STRESS STATE OF RUBBER-CABLE TRACTIVE ELEMENT WITH BROKEN STRUCTURE AND CONSIDERING NONLINEAR DEPENDENCY OF RUBBER SHELL DEFORMATION

Мета. Встановлення закономірностей напружено-деформованого стану гумотросового тягового органа з порушеною структурою з урахуванням нелінійної залежності модуля зсуву від деформацій гумової оболонки.

Методика. Побудова методами теорії композитних матеріалів та аналітичне розв’язання моделі гумотросового каната з порушеною структурою та модулем зсуву гуми, нелінійно залежним від деформацій.

Результати. Побудовано аналітичні залежності, які дозволяють визначати показники напружено-деформованого стану гумотросового каната з порушеною структурою та модулем зсуву гуми, залежним від деформації гуми. Сформульовано алгоритм визначення напруженого стану гумотросового каната з порушеною структурою та модулем зсуву гуми, залежним від деформації еластичних прошарків. Встановлено механізм зміни напруженого стану гумотросового каната з урахуванням нелінійно залежного від деформацій модулю зсуву гуми. Отримані вирази дозволяють визначати внутрішні сили навантаження тросів та їхні переміщення, що дає можливість розраховувати дотичні напруження матеріалу еластичної оболонки, що розташований поміж тросами, які прямо пропорційні тангенсу кута її зсуву.

Наукова новизна. Визначено характер зміни параметрів напружено-деформованого стану гумотросового каната з порушеною структурою з урахуванням нелінійної залежності модуля зсуву від деформацій гумової оболонки.

Практична значущість. Урахування нелінійно залежного модуля зсуву гуми дає можливість деталізувати закономірності основних параметрів напружено-деформованого стану гумотросового каната та дозволяє врахувати вплив цього явища на міцніть каната, а також уточнити прогнозування напруженого стану каната з розривом неперервності тросів та забезпечити можливість підвищення безпеки використання гумотросових канатів, зокрема за використання в якості вантових канатів на капітальних спорудах.

***Ключові слова**: плоский гумотросовий канат, напружено-деформований стан, математична модель, модуль зсуву гуми, деформації гумової оболонки, розрив троса, міцність каната, міжтросовий прошарок гуми, суміжність з ушкодженням, ділянка нелінійності модуля, ділянка місцевих збурень, смуга каната з ушкодженням.*

Вступ. Гумотросові канати використовуються в підйомних машинах. Вони мають значні довжини. Конвеєрні стрічки замкненої форми створюють шляхом з'єднання кінців стрічок. В таких з'єднаннях троси кінців стрічок взаємодіють через гумові прошарки та механічно не з'єднані. В канатах в процесі використання накопичуються ушкодження. Одним з таких ушкоджень є розрив одного з тросів. Розриви суцільності тросів, наявність тросів, що не мають продовження, відповідно до принципу Сен-Венана, є джерелами збурення напружено-деформованого стан каната, стрічки.

Стан питання та постановка задачі дослідження. Міцність каната в перерізі розриву неперервності троса значно менша [1–7], менша вона і в стикових з'єднаннях [8, 9]. В роботі [10] напружено-деформований стан просторових конструкцій, армованих паралельними елементами, запропоновано визначати шляхом електричного моделювання. Спосіб визначення характеристик матеріалів з системою регулярно розташованих паралельних елементів армування запропонована в статті [11]. Досвід свідчить про нелінійну залежність напружень в пружних матеріалах від їх деформацій. Не є винятком і гума. Гумові прошарки в гумотросових канатах забезпечують зв'язок тросів, визначають механізм перерозподілу сил проміж тросами, чим впливають на експлуатаційні характеристики каната. В наведених роботах питання нелінійного закону деформування гуми не розглядалося. Водночас воно становить собою актуальну науково-технічну задачу урахування вказаної особливості при проектуванні та потоковому контролю стану підйомно-транспортних машин з гумотросовим тяговим органом. Її розв'язання дозволяють врахувати вплив характеру деформування гуми на міцніть каната та забезпечують можливість підвищення безпеки використання гумотросових канатів.

Основний зміст роботи. Як правило, графік залежності напружень від деформацій має форму кривої лінії. Основним чинником виникнення напружень зсуву в гумових прошарках каната, стрічки є розрив неперервності тросів. Неперервність тросів має місце у разі розриву троса та в стикових з'єднаннях гумотросових стрічок та канатів. В з'єднаннях усі троси обох кінців сполучених стрічок не мають свого продовження. Розрив троса та кінець троса є джерелом збурення напружено-деформованого стану каната, стрічки. Відомі дослідження [2, 5, 6] показують, що деформації гуми мають місце практично лише в прошарках суміжних з тросом, що має розрив. Їх значення максимальні в перерізі порушення неперервності тросів та за експонентою зменшуються зі зростанням відстані від вказаного перерізу.

Визначення напружено деформованого стану з урахуванням вказаного характеру, зміні деформацій та з урахуванням нелінійної залежності переміщень зсуву від напружень зсуву гуми, складна математична задача. Спростимо її. Приймемо, що залежність напружень зсуву гуми від її деформацій кусочно лінійна та складається з двох частин. Як і в вище згаданих дослідженнях будемо вважати, що троси деформуються як стрижні. Гума сприймає лише напруження зсуву. Канат безмежно довгий, має M тросів та навантажений силою розтягу P. Трос за номером j має розрив неперервності. Переріз з розривом знаходиться на значній відстані від країв каната. Модуль зсуву гуми прошарків, суміжних з ушкодженим тросом на довжинах l_0, відмінний від відповідного модуля зсуву гуми решти прошарків. Лінійний розмір l_0 значно менший за довжину каната, на якій відбувається зміна напруженого стану внаслідок розриву троса. Вздовж каната спрямуємо вісь координат. Її початок ($x = 0$) розташуємо в перерізі розриву троса. Оскільки переріз ($x = 0$) є перерізом симетрії, то переміщення тросів симетричні. При цьому, перерізи усіх тросів, окрім кінців троса з ушкодженням, не переміщуються. Поміж кінцями ушкодженого троса утворюється зазор. Позначимо переміщення кінця ушкодженого троса U_0.

Виокремимо частину довжиною l_0 ($0 \le x \le l_0$). Її будемо вважати першою. Другою будемо вважати частину, для якої ($x > l_0$). Першу частину каната поділимо на три смуги з незмінною кількістю тросів в кожній. До складу двох крайніх смуг внесемо смуги, що не мають ушкодженого троса. Їм надамо номери один та три. До складу другої смуги внесемо частину каната, що має ушкоджений трос та суміжні з ним троси.

Розглянемо вказані смуги як окремі стрічки. Характерною властивістю таких смуг каната є те, що поміж тросами смуг властивості еластичного матеріалу не змінні. Незмінним в нашому випадку є і модуль зсуву гуми в прошарках. Вказане дозволяє використовувати для смуг умови їх рівноваги та форми рішень [2] з урахуванням кількості тросів в смугах та властивостей еластичної оболонки. Складемо вирази, що дозволяють визначати внутрішні сили в тросах та їх переміщення. Для крайніх смуг вирази запишемо в подібних формах. У виразах використаємо додаткові індекси для позначення належності параметрів до однієї або іншої смуги каната. Врахуємо, що перерізи тросів крайніх смуг не пересуваються, коли $x = 0$.

Для смуги каната з номерами тросів ($1 \le i \le j - 1$)

$$p_{1,i} = E\ F\sum_{m=1}^{j-2} A_m\left(e^{\beta_{1,m}x} + e^{-\beta_{1,m}x}\right)\beta_{1,m}\cos\left(\mu_{1,m}\left(i-0{,}5\right)\right) + P, \qquad (1)$$

$$u_{1,i} = \sum_{m=1}^{j-2} A_m\left(e^{\beta_{1,m}x} - e^{-\beta_{1,m}x}\right)\cos\left(\mu_{1,m}\left(i-0{,}5\right)\right) + \frac{P\ x}{E\ F}, \qquad (2)$$

де i – номер троса в смузі, для першої ($1 \le i \le j - 2$); A_m, B_m – сталі інтегрування; E, F – відповідно, приведений модуль пружності на розтяг та площа поперечного перерізу троса каната (стрічки); $\beta_{1,m} = \sqrt{\dfrac{2G_0 b}{(h-d)EF}[1-\cos(\mu_{1,m})]}$; h – відстань поміж тросами; b – товщина каната; d – діаметр троса; G – модуль зсуву еластичного (гумового) прошарку, що з’єднує троси.

Для другої смуги каната з номерами тросів ($j - 1 \le i \le j + 1$) маємо

$$p_{2,i} = E\ F\sum_{m=1}^{2}\left(A_{m+j-2}e^{\beta_{2,m}x} - B_{m+j-2}e^{-\beta_{2,m}x}\right)\beta_{2,m}\cos\left(\mu_{2,m}\left(i-j-1{,}5\right)\right) + P, \qquad (3)$$

$$u_{2,i} = \sum_{m=1}^{2}\left(A_{m+j-2}e^{\beta_{2,m}x} + B_{m+j-2}e^{-\beta_{2,m}x}\right)\cos\left(\mu_{2,m}\left(i-j-1{,}5\right)\right) + \frac{P\,x}{E\ F}, \quad (4)$$

де $\mu_{2,m} = \frac{\pi m}{3}$; $\beta_{2,m} = \sqrt{\frac{2G_0 b\ k}{(h-d)EF}[1-\cos(\mu_{2,m})]}$; k – коефіцієнт, що враховує відмінність модуля зсуву гуми другої смуги.

Для смуги каната з номерами тросів ($j + 1 \le i < M$)

$$p_{3,i} = E\ F\sum_{m=1}^{M-j-1} A_{m+j}\left(e^{\beta_{3,m}x} + e^{-\beta_{3,m}x}\right)\beta_{3,m}\cos\left(\mu_{3,m}\left(i-j-1{,}5\right)\right) + P, \quad (5)$$

$$u_{3,i} = \sum_{m=1}^{M-j-1} A_{m+j}\left(e^{\beta_{3,m}x} - e^{-\beta_{3,m}x}\right)\cos\left(\mu_{3,m}\left(i-j-1{,}5\right)\right) + \frac{P\,x}{E\ F}, \quad (6)$$

де $\mu_{3,m} = \frac{\pi m}{M-j}$; $\beta_{3,m} = \sqrt{\frac{2G_0 f(t) b k_G}{(h-d)EF}[1-\cos(\mu_{3,m})]}$.

Прийняті рішення відповідають умовам відсутності впливу зовнішніх чинників на крайні троси смуг на інтервалі ($0 \le x \le l_0$). Троси, суміжні з ушкодженим, входять до складу двох смуг – крайньої та не крайньої. В крайніх смугах, на суміжні з ушкодженим тросом, відповідно з рішеннями (1), (2) та (5), (6) не діють збурення. Вони навантажені лише рівномірно розподіленими силами. Троси в перерізі $x = 0$ закріплені нерухомо. В загальному рішенні, на підставі принципу суперпозиції, до переміщень цих тросів додамо їх переміщення як тросів, що входять до складу середньої смуги без урахування сили зовнішнього їх навантаження.

Кінець середнього тросу середньої смуги під дією зовнішньої сили переміщається на невідому величину U_0. Вказане запишемо у формі граничної умови для перерізу $x = 0$

$$u_{2,i} = U_0\begin{cases} 0 & i \ne j \\ 1 & i = j \end{cases}. \quad (7)$$

Відповідно до (7) закон переміщень тросів відповідає добутку переміщення середнього троса та δ-функції Дірака. Приймемо функцію Дірака у формі ряду Фур'є на заданому відрізку номерів тросів. З виразу (4) маємо

$$\sum_{m=1}^{2}\left(A_{m+j-2} + B_{m+j-2}\right)\cos\left(\mu_{2,m}\left(i-0{,}5\right)\right) = \frac{2}{3}U_0\sum_{m=1}^{2}\cos\left(\frac{3}{2}\mu_{2,m}\right)\cos\left(\mu_{2,m}\left(i-0{,}5\right)\right),$$

$\left(i = 1,\ 2,\ 3\right)$;

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

З умови, що навантаження ушкодженого троса в перерізі ушкодження дорівнює нулю, з виразу (3) маємо

$$U_0 = \frac{3P}{2\beta_{2,m} E\ F \cos^2\left(1{,}5\mu_{2,m}\right)} + 3\frac{A_{m+j-2}}{\cos\left(1{,}5\mu_{2,m}\right)}.$$

Відповідно вираз набуває вигляду

$$B_{m+j-2} = \frac{P}{\beta_{2,m} E\ F \cos\left(1{,}5\mu_{2,m}\right)} + 2A_{m+j-2}.$$

Вирази сил (3) та переміщень (4) з урахуванням загальної нумерації тросів в перерізі каната набувають наступних форм

$$p_{2,i} = E\ F \sum_{m=1}^{2} \left(\left(A_{m+j-2}\left(e^{\beta_{2,m}x} - 2e^{-\beta_{2,m}x}\right)\beta_{2,m} - \frac{Pe^{-\beta_{2,m}x}}{\cos\left(1{,}5\mu_{2,m}\right)} \right) \times \atop \times\cos\left(\mu_{2,m}\left(i-j-1{,}5\right)\right) \right) + P, \quad (8)$$

$$u_{2,i} = \sum_{m=1}^{2} \left(\left(A_{m+j-2}\left(e^{\beta_{2,m}x} + e^{-\beta_{2,m}x} + 0{,}5\right) + \frac{P\left(e^{-\beta_{2,m}x} + 0{,}5\right)}{\beta_{2,m} E\ F \cos\left(1{,}5\mu_{2,m}\right)} \right) \times \atop \times\cos\left(\mu_{2,m}\left(i-j-1{,}5\right)\right) \right) + \frac{P\ x}{E\ F}. \quad (9)$$

З використанням (1), (2), (5), (6), (8), (9) запишемо значення сил та переміщень як єдині функції на кінченій осі номерів тросів

$$p_i = \frac{2\ E\ F}{M} \sum_{n=1}^{M-1} \rho_n\left(x\right)\cos\left(\mu_n\left(i-0{,}5\right)\right) + P, \quad (10)$$

де $\mu_n = \dfrac{\pi n}{M-1}$;

$$\rho_n\left(x\right) = \sum_{\chi=1}^{j-1}\sum_{m=1}^{j-2} \left(A_m\left(e^{\beta_{1,m}x} + e^{-\beta_{1,m}x}\right)\beta_{1,m} \times \atop \times\cos\left(\mu_{1,m}\left(\chi-0{,}5\right)\right)\cos\left(\mu_n\left(\chi-0{,}5\right)\right) \right) +$$

$$+ \sum_{\chi=1}^{3}\sum_{m=1}^{2} \left(\left(A_{m+j-2}\left(e^{\beta_{2,m}x} - 2e^{-\beta_{2,m}x}\right)\beta_{2,m} - \frac{Pe^{-\beta_{2,m}x}}{E\ F\cos\left(1{,}5\mu_{2,m}\right)} \right) \times \atop \times\cos\left(\mu_{2,m}\left(\chi-0{,}5\right)\right)\cos\left(\mu_n\left(\chi+j-2{,}5\right)\right) \right) +$$

$$+ \sum_{\chi=1}^{M-j-1}\sum_{m=1}^{M-j-1} \left(A_{m+2}\left(e^{\beta_{3,m}x} + e^{-\beta_{3,m}x}\right)\beta_{3,m} \times \atop \times\cos\left(\mu_{3,m}\left(\chi-0{,}5\right)\right)\cos\left(\mu_n\left(\chi+j-0{,}5\right)\right) \right);$$

$$u_i = \frac{2}{M}\sum_{n=1}^{M} \upsilon_n(x)\cos\left(\mu_n(i-0{,}5)\right) + \frac{P\ x}{E\ F}, \tag{11}$$

де

$$\upsilon_n(x) = \sum_{\chi=1}^{j-1}\sum_{m=1}^{j-2}\begin{pmatrix} A_m\left(e^{\beta_{1,m}x} - e^{-\beta_{1,m}x}\right)\times \\ \times\cos\left(\mu_{1,m}(\chi-0{,}5)\right)\cos\left(\mu_n(\chi-0{,}5)\right)\end{pmatrix} +$$

$$+\sum_{\chi=1}^{3}\sum_{m=1}^{2}\begin{pmatrix}\left(A_{m+j-2}\left(e^{\beta_{2,m}x} + e^{-\beta_{2,m}x}\right) + \dfrac{Pe^{-\beta_{2,m}x}}{\beta_{2,m}E\ F\cos\left(1{,}5\mu_{2,m}\right)}\right)\times \\ \times\cos\left(\mu_{2,m}(\chi-0{,}5)\right)\cos\left(\mu_n(\chi+j-2{,}5)\right)\end{pmatrix} +$$

$$+\sum_{\chi=1}^{M-j-1}\sum_{m=1}^{M-j-1}\begin{pmatrix} A_{m+2}\left(e^{\beta_{3,m}x} - e^{-\beta_{3,m}x}\right)\times \\ \times\cos\left(\mu_{3,m}(\chi-0{,}5)\right)\cos\left(\mu_n(\chi+j-0{,}5)\right)\end{pmatrix}.$$

Вирази (10), (11) отримані для першої частини каната для ($0 \le x \le l_0$). В перерізі $x = l_0$ розглянута частина каната, що взаємодіє з другою його частиною. Вирази сил ($p_{0,i}$) та переміщень ($u_{0,i}$) для другої частини запишемо у формах [2]. Разом з тим врахуємо, що безмежне зростання значення координати x не може призводити до безмежного зростання сил навантажень тросів та їх переміщень

$$p_{0,i} = -E\,F\sum_{n=1}^{M-1} B_{0,n}e^{-\beta_n^* x}\beta_n^*\cos\left(\mu_n(i-0{,}5)\right) + P,$$

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

де $\beta_n = \sqrt{\dfrac{2G_0 b}{(h-d)E\,F}[1-\cos(\mu_n)]}.$

При цьому в перерізі $x = l_0$ мають виконуватися умови сумісності деформування частин каната

$$p_{0,i} = p_i, \tag{12}$$

$$u_{0,i} = u_i, \tag{13}$$

З виразів (10), (11) та умов (12), (13) маємо рівності

$$B_{0,n}e^{-\beta_n^* l_0} = -\frac{2}{M\ \beta_n^*}\rho_n\left(x = l_0\right), \tag{14}$$

$$B_{0,n}e^{-\beta_n^* l_0} = \frac{2}{M}\upsilon_n\left(x = l_0\right). \tag{15}$$

Отримаємо систему N-1 рівнянь

$$\sum_{\chi=1}^{j-1}\sum_{m=1}^{j-2}\left(\begin{array}{l} A_m\left(e^{\beta_{1,m}l_0}\left(1+\frac{\beta_{1,m}}{\beta_n^*}\right)-e^{-\beta_{1,m}l_0}\left(1-\frac{\beta_{1,m}}{\beta_n^*}\right)\right)\times \\ \times\cos\left(\mu_{1,m}\left(\chi-0,5\right)\right)\cos\left(\mu_n\left(\chi-0,5\right)\right)\end{array}\right)+$$

$$+\sum_{\chi=1}^{3}\sum_{m=1}^{2}\left(\begin{array}{l}\left(\begin{array}{l} A_{m+j-2}\left(e^{\beta_{2,m}l_0}\left(1+\frac{\beta_{2,m}}{\beta_n^*}\right)+e^{-\beta_{2,m}l_0}\left(1-2\frac{\beta_{2,m}}{\beta_n^*}\right)\right)+ \\ +\frac{Pe^{-\beta_{2,m}l_0}}{E\ F\cos\left(1,5\mu_{2,m}\right)}\left(\frac{1}{\beta_{2,m}}-\frac{1}{\beta_n^*}\right)\end{array}\right)\times \\ \times\cos\left(\mu_{2,m}\left(\chi-0,5\right)\right)\cos\left(\mu_n\left(\chi+j-2,5\right)\right)\end{array}\right)+$$

$$+\sum_{\chi=1}^{M-j-1}\sum_{m=1}^{M-j-1}\left(\begin{array}{l} A_{m+2}\left(e^{\beta_{3,m}l_0}\left(1+\frac{\beta_{3,m}}{\beta_n^*}\right)-e^{-\beta_{3,m}l_0}\left(1-\frac{\beta_{3,m}}{\beta_n^*}\right)\right)\times \\ \times\cos\left(\mu_{3,m}\left(\chi-0,5\right)\right)\cos\left(\mu_n\left(\chi+j-0,5\right)\right)\end{array}\right). \qquad (16)$$

Розв'язання отриманої системи рівнянь (16) дозволяє визначити невідомі сталі, внутрішні сили навантаження тросів та їх переміщення. Відомі переміщення дозволяють встановлювати дотичні напруження матеріалу еластичної оболонки, що розташований поміж тросами, які прямо пропорційні тангенсу кута її зсуву

$$tg\left(\gamma_i\right)=\frac{u_i-u_{+1}}{h}, \quad \left(1\le i<M\right).$$

Висновки. Шляхом аналітичного розв'язання моделі гумотросового тягового органа з порушеною структурою та нелінійно залежного від деформацій модулю зсуву гуми, встановлені залежності зміни його напружено-деформованого стану.

В процесі розв'язання моделі сформульовано алгоритм визначення напруженого стану гумотросового тягового органа з порушеною структурою. Встановлено механізм зміни напруженого стану гумотросового каната з урахуванням нелінійно залежного від деформацій модулю зсуву гуми.

Урахування нелінійно залежного від деформацій модулю зсуву гуми надає можливість уточнення прогнозування напруженого стану каната з розривом неперервності тросів, сприяє підвищенню безпеки та надійності використання гумотросових тягових органів.

Результати отримані з використанням відомої, побудованої методами теорії композитних матеріалів моделі гумотросового каната, виконано її розв'язання аналітичними методами. В моделі враховано нелінійний закон деформування гуми. Вказане дозволяє вважати отримані результати достатньо достовірними та такими, що уточнюють уяву про механізм деформування гумотросових канатів та стрічок.

Перелік посилань

1. Volokhovskii, V.Yu., Radin, V.P., & Rudyak, M.B. (2010). Kontsentratsiya usilii v trosakh i nesushchaya sposobnost rezinotrosovikh konveiernikh lent s povrezhdeniyami. *Vestnik MEI, 5*, 5–12.
2. Belmas, I.V. (1993). Napryazhennoe sostoyanie rezinotrosovoi lenti pri proizvolnom povrezhdenii trosov. *Problemi prochnosti i nadezhnosi mashin, 6*, 45–48.
3. Song, W., Shang, W., & Li, X. (2009). Finite element analysis of steel cord conveyor belt splice. International Technology and Innovation Conference 2009 (ITIC 2009), 37–37. https://doi.org/10.1049/cp.2009.1415
4. Kolosov, L.V., & Belmas, I.V. (1990). Issledovanie mekhanicheskikh kharakteristik metallotrosov. Izvestiya vuzov. *Gornii zhurnal, 9*, 81–83.
5. Kolosov, L.V., & Belmas, I.V. (1900). Issledovanie prochnostnikh kharakteristik obraztsov povrezhdennikh rezinotrosovikh lent. *Izvestiya vuzov. Gornii zhurnal, 8*, 81–84.
6. Kolosov, L.V., & Belmas, I.V. (1991). Eksperimentalnie issledovaniya agregatnoi prochnosti RTL. Izvestiya vuzov. *Gornii zhurnal, 1*, 85–87.
7. Ropai, V.A. (2016). *Shakhtnie uravnoveshivayushchie kanati: monografiya*. Natsionalnii gornii universitet.
8. Levchenya, Zh.B. (2004). *Povishenie nadezhnosti stikovikh soedinenii konveiernikh lent na gornodobivayushchikh predpriyatiyakh: Na primere RUP "PO "Belaruskalii"* (dissertatsiya ... kandidata tekhnicheskikh nauk : 05.05.06.)
9. Танцура, Г.І.(2010). *Гнучкі тягові органи. Стикові з'єднання конвеєрних стрічок*. ДДТУ.
10. Kolosov, L.V., & Belmas, I.V. (1981). Primenenie elektricheskikh modelei dlya issledovaniya kompozitnikh materialov. *Mekhanika kompozitnikh materialov, 1*, 115–119.
11. Дарія, З.С. (2013). Чисельна методика визначення ефективних характеристик односпрямовано армованих композитів. *Вісник НТУ «ХПІ», 58*, 71–77.

ABSTRACT

Purpose. Establishment of dependencies of a stress-strain state in a rubber-cable tractive element with a broken structure considering a nonlinear dependency of shear modulus on rubber shell deformations.

Research methodology. Construction by methods of the theory of composite materials and analytical solution of a rubber-cable rope model with a broken structure and a rubber shear modulus nonlinearly dependent on deformations.

Findings. Analytical dependencies are constructed that allow determining the indicators of a stress-strain state in a rubber-cable rope with a broken structure and a rubber shear modulus depending on rubber deformation. An algorithm for determining a stress-strain state of a rubber-cable rope with a broken structure and a rubber shear modulus dependent on deformation of elastic layers is formulated. A mechanism for changing a stress-strain state of a rubber-cable rope is established, taking into account the nonlinear deformation-dependent shear modulus of rubber. The obtained expressions make it possible to determine the internal loading forces on cables and their displacements, which allow calculating tangential stresses in the elastic shell material located between the cables, which are directly proportional to the tangent of the angle of its displacement.

Scientific novelty. The character of change for parameters of a stress-strain state in a rubber-cable rope with a broken structure considering a nonlinear dependency of shear modulus on rubber shell deformations is determined.

Practical significance. Taking into account a non-linearly dependent shear modulus of rubber makes it possible to specify the dependencies of main parameters of a stress-strain state of rubber-cable rope and allows considering the effect of this phenomenon on rope strength, as well as to clarify the prediction of a stress state in a rope with a cable continuity breakage and to ensure a possibility of increasing the operational safety of rubber-cable ropes, in particular by using as stay ropes in capital structures.

Keywords: *flat rubber-cable rope, stress-strain state, mathematical model, shear modulus of rubber, deformations of rubber shell, cable breakage, rope strength, inter-cable layer of rubber, adjacency to damage, part of modulus nonlinearity, part of local disturbances, rope stripe with damage.*