

© І.В. Бельмас¹, Д.Л. Колосов², О.І. Білоус¹, Г.І. Танцура¹, С.В. Онищенко²

¹ Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське, Україна

² Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН КОМПОЗИТНОЇ БАГАТОШАРОВОЇ ВАНТИ З УРАХУВАННЯМ РОЗРИВІВ ЕЛЕМЕНТІВ АРМУВАННЯ ТА НЕЛІНІЙНОГО РОЗПОДІЛУ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

© I. Belmas¹, D. Kolosov², O. Bilous¹, H. Tantsura¹, S. Onyshchenko²

¹ Dniprovsk State Technical University, Kamianske, Ukraine

² Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

STRESS-STRAIN STATE OF COMPOSITE MULTI-LAYER STAY ROPE CONSIDERING BREAKAGES IN REINFORCING ELEMENTS AND NONLINEAR DISTRIBUTION OF MECHANICAL PROPERTIES

Мета. Формулювання алгоритму урахування впливу розривів неперервності волоконних елементів армування ванти на її міцність.

Методика. Побудова та аналітичне розв'язання математичної моделі взаємодії паралельних волоконних елементів армування, з'єднаних еластичними матеріалом, у разі порушення неперервності окремих елементів армування.

Результати. Розроблено алгоритм розрахунку на статичну міцність багатошарової ванти з розривами елементів армування в одному перерізі. Встановлено, що розрив неперервності довільного елемента армування ванти призводить до суттєвої зміни внутрішніх навантажень лише суміжних елементів армування з ушкодженим та практично не залежить від нелінійного характеру деформування складових ванти. Більші навантаження елементів армування мають місце у разі розриву кутового елемента армування, а найменші – у разі розриву центрального. Встановлено, що кількість рядів укладання елементів армування у ванті та місце розташування ушкодженого елемента армування несуттєво впливає на переміщення його кінця та не впливає на розподіл навантажень поміж елементами армування в перерізі ушкодження. Переміщення залежать від змінного по довжині ванти відношення модулів пружності на зсув еластичного матеріалу та елементів армування на розтяг. Встановлено, що місце розташування елемента армування з розривом неперервності несуттєво впливає на характер відносного зростання деформацій ванти у разі прояву нелінійного характеру деформування еластичної оболонки. Нелінійність деформування складових ванти не впливає на перерозподіл сил у ванті з ушкодженими елементами армування. Максимальні відносні переміщення елементів армування та зумовлені ними максимальні кути зсуву матеріалу, розташованого поміж елементами армування, менші за значення прийнятого коефіцієнта нелінійності. Характери переміщень елементів армування якісно близькі.

Наукова новизна. Розроблено аналітичний алгоритм розрахунку напружено-деформованого стану багатошарової ванти з урахуванням її конструкції, нелінійно розподілених вздовж ванти механічних властивостей її складових з ушкодженнями довільної групи елементів армування в одному перерізі.

Практична значущість. Розроблений алгоритм дозволяє урахувати нелінійний характер деформування складових ванти на її напружений стан у разі розривів довільної кількості

довільно розташованих у ванті елементів армування з розривом неперервності в одному перерізі. Алгоритм може бути застосований для визначення напружено-деформованого стану вантового каната з ушкодженнями в його перерізі, безмежно віддаленому від кінців каната. Алгоритм дозволяє урахувати вплив розривів елементів армування на міцність ванти, чим підвищити її надійність в споруді.

Ключові слова: багат шарова композитна ванта, напружено-деформований стан, розрив армування ванти, нелінійність характеру деформування, нелінійність розподілу властивостей.

Вступ. Ванта – важлива складова вантової споруди. Навіть часткова втрата вантою її тягової спроможності впливає на надійність конструкції. Урахування такої втрати – актуальна задача, а її розв’язання забезпечить підвищення надійності вантової споруди.

Аналіз стану питання. Практикою доведена ефективність сталевозалізобетонних автодорожніх мостів [1]. Встановлення технічного стану споруди – умова прийняття обґрунтованих рішень [2]. Ванта, здебільшого, складена з системи паралельних волокон, укладених в декілька шарів та з’єднаних еластичним матеріалом. Плоский гумотросовий канат має схожу конструкцію. Троси в ньому розташовані одним шаром. В роботі [3] досліджено розриви елементів армування гумотросового каната врівноважування. В роботі [4] обґрунтовано спосіб визначення міцності композитного тягового органа зі змінною за довжиною кількістю елементів армування. Руйнування матеріалу, що з’єднує елементи армування в області локального дефекту, суттєво впливає на механізм руйнування композита в цілому – це доведено в роботах [5, 6]. Передбачувана надійність композитних муфт з’єднання труб розглянута в роботі [7]. Розподіл сил поміж тросами різної жорсткості гумотросової стрічки – в роботі [8], а в її з’єднаннях – в роботі [9]. В [10], в межах лінійного деформування, досліджено вплив розриву елементів армування на міцність ванти. Вплив нелінійного характеру деформування складових одношарового гумотросового каната розглянуто в роботі [11].

Відомо, що навіть часткове руйнування деталі призводить до часткової втрати споживчих характеристик. В загальному випадку ванта може мати декілька ушкоджених елементів армування. Розрив одного елемента, відповідно до принципу Сен-Венана, локально збурює напружено-деформований стан ванти. Відповідно [3], внаслідок розриву троса, навантаження зростає практично лише в суміжних тросах та локалізується по довжині каната. В матеріалі частини ванти волоконної конструкції можливе виникнення умов нелінійного деформування її складових.

Основна частина дослідження. Сформулюємо метод визначення напружено-деформованого стану вантового каната з розривами неперервності групи елементів армування. Нехай ванта має по M елементів армування, розташованих в N шарах. В канаті ушкоджено декілька волокон на значних відстанях від його країв. Пари номерів волокон армування з ушкодженнями об’єднуємо в множину

$$w(I_\nu, J_\nu) \in W \quad (1 \leq \nu \leq \gamma), \quad (1)$$

де γ – загальна кількість елементів армування з розривами неперервності.

Початок осі z сумістимо з перерізом ушкодження. Симетричність задачі дозволяє розглянути половину каната. Внаслідок симетричності перерізи неушкоджених елементів армування до навантаження та після нього лежать в одній площині. Кінці ж ушкоджених елементів після навантаження зміщуються. Величини зміщень взаємозалежні і прямопропорційні прикладеному до ванти зусиллю розтягу та заздалегідь невідомі. Їх в перерізі $z = 0$ задамо невідомою множиною значень

$$\zeta_\nu \in U_0 \quad (1 \leq \nu \leq R).$$

Сформулюємо умови переміщень та навантаження елементів армування з розривами неперервності в перерізі $z = 0$ в наступній формі

$$u_{i,j} = \zeta_\nu \begin{cases} 0 & i \neq I_\nu \vee j \neq J_\nu \\ 1 & i = I_\nu \wedge j = J_\nu \end{cases}, \quad (2)$$

$$p_{I,J} = 0 \quad (i = I_\nu \wedge j = J_\nu). \quad (3)$$

Скористаємося описаною вище локальністю збурення напружено-деформованого стану ванти локальними дискретними переміщеннями (2). Локальну зміну властивостей змодельюємо нелінійно змінною величиною. Її значення приймемо пропорційним співвідношенню модулів зсуву матеріалу матриці та розтягу волокон армування та таким, що з безмежним зростанням відстані від розриву наближається до одиниці. Скористуємося сформульованою в роботі [10] системою однорідних рівнянь рівноваги елементів армування вантового каната. В ній врахуємо введену величину пропорційності $\Omega(z) = (1 - (1 - K)e^{-z})$. Отримаємо систему однорідних диференціальних рівнянь рівноваги волокон в їх переміщеннях

$$\frac{d^2 u_{i,j}}{dz^2} + \frac{G\Omega(z)}{E F} \left(\begin{array}{l} \frac{k_a a}{(b-d)} (u_{i-1,j} - 2u_{i,j} + u_{i+1,j}) + \\ \frac{k_b b}{(a-d)} (u_{i,j-1} - 2u_{i,j} + u_{i,j+1}) + \\ + u_{i-1,j-1} + u_{i+1,j+1} + u_{i-1,j+1} + u_{i+1,j-1} - 4u_{i,j} \end{array} \right) = 0, \quad (4)$$

де $u_{i,j}$ – переміщення i -того елемента армування j -того шару вздовж ванти – осі z ; G – модуль зсуву матеріалу, що з'єднує елементи армування; E, F, d – модуль пружності матеріалу, площа перерізу та діаметр волоконних елементів армування, відповідно; a, b – кроки укладання елементів армування в шарах та кроки шарів; k_a, k_b – коефіцієнти, що враховують вплив форми перерізу еластичного матеріалу ванти, розташованого поміж елементами армування на її жорсткість; $1 > K \geq 0$ – коефіцієнт, що враховує відхилення від прямопропорційного відношення переміщень та напружень складових вантового каната.

Рівняння рівноваги прийнятні для усіх елементів армування окрім елементів, розташованих на поверхні ванти. Доповнимо систему однорідних диференціальних рівнянь наступними співвідношеннями

$$u_{1,j} = u_{0,j}, u_{M,j} = u_{M+1,j}, u_{i,1} = u_{i,0}, u_{i,N} = u_{i,N+1}. \quad (5)$$

Співвідношення (5) відтворюють умову відсутності дотичних навантажень, прикладених до зовнішніх поверхонь ванти.

Як і в роботі [10], розв'язок однорідної системи рівнянь в переміщеннях (4), з урахуванням співвідношень (5) шукатимемо у формі добутку функцій, залежних лише від координати z , та функцій, залежних від місця розташування елементів армування в шарах та номерів шарів

$$u_{i,j} = \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} e^{\beta_{m,n} z} \cos(\mu_m (i-0,5)) \cos(\chi_n (j-0,5)) + \sum_{m=1}^{M-1} e^{\beta_{m,m} z} \cos(\mu_m (i-0,5)) + \sum_{n=1}^{N-1} e^{\beta_{n,n} z} \cos(\chi_n (j-0,5)), \quad (6)$$

$$\text{де } \mu_m = \frac{\pi m}{M}, \chi_n = \frac{\pi n}{N}; \beta_{m,n} = \sqrt{\frac{2G}{E F} \left(\frac{k_a a}{b-d} (1 - \cos(\mu_m)) + \frac{k_b b}{a-d} (1 - \cos(\chi_n)) + 2 - \cos(\mu_m) - \cos(\chi_n) \right)},$$

$$\beta_{m,m} = \sqrt{\frac{2G}{E F} (1 - \cos(\mu_m)) \left(\frac{k_a a}{b-d} + 1 \right)}, \beta_{n,n} = \sqrt{\frac{2G}{E F} (1 - \cos(\chi_n)) \left(\frac{k_b b}{a-d} + 1 \right)}.$$

Наведене дозволяє сформулювати загальну форму виразу переміщень елементів армування ванти

$$u_{i,j} = \left(\sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} \left[\left(A_{m,n} e^{\beta_{m,n} \Omega(z) z} + B_{m,n} e^{-\beta_{m,n} \Omega(z) z} \right) \times \cos(\mu_m (i+0,5)) \cos(\chi_n (j+0,5)) \right] + \sum_{m=1}^{M-1} \left(A_{m,m} e^{\beta_{m,m} \Omega(z) z} + B_{m,m} e^{-\beta_{m,m} \Omega(z) z} \right) \cos(\mu_m (i+0,5)) + \sum_{n=1}^{N-1} \left(A_{n,n} e^{\beta_{n,n} \Omega(z) z} + B_{n,n} e^{-\beta_{n,n} \Omega(z) z} \right) \cos(\chi_n (j+0,5)) \right) + \frac{P z}{E F} + \delta, \quad (7)$$

де $A_{m,n}, B_{m,n}, A_{m,m}, B_{m,m}, A_{n,n}, B_{n,n}$ – масиви сталих коефіцієнтів; δ – переміщення ванти як жорсткого тіла.

За законом Гука, з виразу (7) розподіл сил поміж елементами армування ванти у випадку нелінійності деформування лише матеріалу матриці

$$p_{i,j} = EF \left(\begin{aligned} & \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} \left(A_{m,n} \lambda(z)_{1,m,n} + B_{m,n} \gamma(z)_{2,m,n} \right) \cos(\mu_m(i+0,5)) \cos(\chi_n(j+0,5)) + \\ & + \sum_{m=1}^{M-1} \left(A_m \gamma_m(z)_{1,m} + B_m \gamma_m(z)_{2,m} \right) \cos(\mu_m(i+0,5)) + \\ & + \sum_{n=1}^{N-1} \left(A_n \gamma_n(z)_{1,n} + B_n \gamma_n(z)_{2,n} \right) \cos(\chi_n(j+0,5)) \end{aligned} \right) + P, \quad (8)$$

$$\text{де } \gamma(z)_{1,m,n} = - \left(e^{-z} (K-1) \left(\frac{z}{2} - 1 \right) - 1 \right) \beta_{m,n} \frac{\exp(\sqrt{\Omega(z)} z \beta_{m,n})}{\sqrt{\Omega(z)}};$$

$$\gamma(z)_{2,m,n} = \left(e^{-z} (K-1) \left(\frac{z}{2} - 1 \right) - 1 \right) \beta_{m,n} \frac{\exp(-\sqrt{\Omega(z)} z \beta_{m,n})}{\sqrt{\Omega(z)}};$$

$$\gamma_m(z)_{1,m} = - \left(e^{-z} (K-1) \left(\frac{z}{2} - 1 \right) - 1 \right) \beta_m \frac{\exp(\sqrt{\Omega(z)} z \beta_m)}{\sqrt{\Omega(z)}};$$

$$\gamma_m(z)_{2,m} = \left(e^{-z} (K-1) \left(\frac{z}{2} - 1 \right) - 1 \right) \beta_m \frac{\exp(-\sqrt{\Omega(z)} z \beta_m)}{\sqrt{\Omega(z)}};$$

$$\gamma_n(z)_{1,n} = - \left(e^{-z} (K-1) \left(\frac{z}{2} - 1 \right) - 1 \right) \beta_n \frac{\exp(\sqrt{\Omega(z)} z \beta_n)}{\sqrt{\Omega(z)}};$$

$$\gamma_n(z)_{2,n} = \left(e^{-z} (K-1) \left(\frac{z}{2} - 1 \right) - 1 \right) \beta_n \frac{\exp(-\sqrt{\Omega(z)} z \beta_n)}{\sqrt{\Omega(z)}}.$$

Максимальні дотичні напруження виникають в прошарках матриці поміж волокнами одного шару та поміж волокнами суміжних шарів. У випадку нелінійного характеру деформування еластичного матеріалу ванти

$$\tau_{i,j} = \frac{2Gk_a(1 - Ke^{-z})}{b-d} (u_{i,j} - u_{i,j+1}), \quad \tau_{i,j} = \frac{2Gk_b(1 - Ke^{-z})}{a-d} (u_{i,j} - u_{i+1,j}). \quad (9)$$

В мостобудуванні використовують ванти значної довжини. Об'єктивно, що з безмежним зростанням координати z переміщення, внутрішні сили, що виникають в елементах армування ванти, не зростають безмежно. Забезпечимо таку особливість розподілу сил та переміщень у ванті. Прийемо

$$A_{m,n} = A_m = A_n = 0. \quad (10)$$

Умова (2) має форму суми δ -функцій Дірака. Прирівняємо переміщення елементів армування (7) в перерізі $z = 0$ сумі функцій Дірака. Останні задамо рядами Фур'є в дискретних координатах. Осі координат прийемо обмеженими

кількістю елементів армування в шарах та кількістю шарів ванти. Отримаємо вирази невідомих коефіцієнтів та переміщення ванти як жорсткого тіла

$$\left[\begin{aligned} B_{m,n} &= \frac{4}{M N} \sum_{\nu=1}^{\gamma} \zeta_{\nu} \cos(\mu_m(I_{\nu}-0,5)) \cos(\chi_n(J_{\nu}-0,5)); \\ Bm_m &= \frac{2}{M N} \sum_{\nu=1}^{\gamma} \zeta_{\nu} \cos(\mu_m(I_{\nu}-0,5)); \\ Bn_n &= \frac{2}{M N} \sum_{\nu=1}^{\gamma} \zeta_{\nu} \cos(\chi_n(J_{\nu}-0,5)); \\ \delta &= \frac{\sum_{\nu=1}^{\gamma} \zeta_{\nu}}{M N}. \end{aligned} \right. \quad (11)$$

Врахуємо отримані вирази невідомих коефіцієнтів (11), граничну умову щодо рівності нулю навантажень кінців ушкоджених волокон (3). Врахуємо значення коефіцієнтів, коли $z = 0$. Сформулюємо систему рівнянь порядку γ відносно вектора невідомих переміщень елементів армування ванти, заданих множиною $\zeta_{\nu} \in U_0$ ($1 \leq \nu \leq \gamma$) в перерізі $z = 0$

$$\begin{aligned} &\sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} B_{m,n} \gamma(z=0)_{2,m,n} \cos(\mu_m(I_{\nu}+0,5)) \cos(\chi_n(J_{\nu}+0,5)) + \\ &\quad + \sum_{m=1}^{M-1} Bm_m \gamma_m(z=0)_{2,m} \cos(\mu_m(I_{\nu}+0,5)) + \\ &\quad + \sum_{n=1}^{N-1} Bn_n \gamma_n(z=0)_{2,n} \cos(\chi_n(J_{\nu}+0,5)) = -\frac{P}{E F}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$w(I_{\nu}, J_{\nu}) \in W \quad (1 \leq \nu \leq \gamma).$$

Підставимо (11) в (12), отримаємо наступну систему лінійних алгебраїчних рівнянь. Порядок системи дорівнює кількості ушкоджених волокон

$$\zeta_{\nu} \left[\begin{aligned} &\sum_{m=1}^{M-1} \sum_{n=1}^{N-1} 2 \sum_{\nu=1}^{\gamma} \cos^2(\mu_m(I_{\nu}+0,5)) \cos^2(\chi_n(J_{\nu}+0,5)) \gamma(x=0)_{2,m,n} + \\ &\quad + \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{\nu=1}^{\gamma} \cos^2(\mu_m(I_{\nu}+0,5)) \gamma_m(x=0)_{2,m} + \\ &\quad + \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{\nu=1}^{\gamma} \cos^2(\chi_n(J_{\nu}+0,5)) \gamma_n(x=0)_{2,n} \end{aligned} \right] = -\frac{P M N}{2 E F}. \quad (13)$$

Розв'язання системи (13) з урахуванням співвідношень (5) дозволяє визначити переміщення елементів армування з розривами неперервності. За їх

значеннями визначаються коефіцієнти (11) та за виразами (7), (8), з урахуванням (10), – вирази переміщень та сил навантаження елементів армування ванти, максимальні кути (9) зсуву матеріалу, що з'єднує волокна. Зазначене дозволяє реалізувати шуканий алгоритм урахування впливу розривів елементів армування на міцність композитної ванти.

Розглянемо вантовий канат з елементами армування діаметром 8,25 мм, укладених з кроком $1,2d$ в обох ортогональних напрямках. Досліджували випадки, за яких розрив неперервності мають кутовий та центральний елементи армування ванти для вант, складених за схемами $2 \times M$ та $M \times M$ за значень $M = 5$.

Отримані результати дають підстави зробити наступні висновки. Кількість рядів укладання елементів армування у ванті та місце розташування ушкодженого елемента армування несуттєво впливає на переміщення його кінця та не впливає на розподіл навантажень поміж елементами армування в перерізі ушкодження. Переміщення залежать від змінного по довжині ванти відношення модулів пружності на зсув еластичного матеріалу та елементів армування на розтяг.

Розрахунки показали, що нелінійність деформування практично не впливає на розподіл внутрішніх сил навантаження елементів армування в перерізі приєднання ванти. Відхилення максимальних значень не перевищує 1%. Залежності відносних показників напружено-деформованого стану ванти, зумовлені нелінійною зміною відношення модулів пружності на зсув та розтяг ($K = 0,5$), від кількості елементів армування в шарах ванти M та за ушкодженого кутового елемента армування, наведені на рисунку 1.

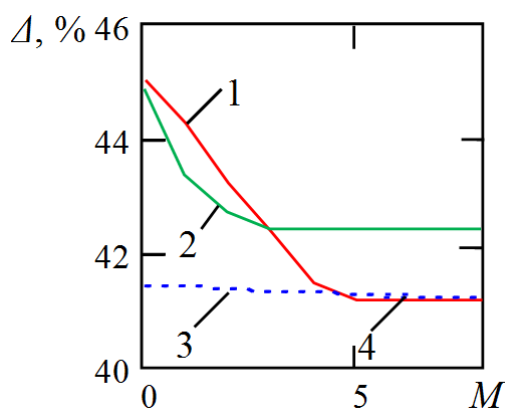


Рис. 1. Залежності від кількості елементів армування в шарах ванти M відносних показників напружено-деформованого стану Δ внаслідок нелінійного закону зміни жорсткості на зсув за $K = 0,5$ та за незакріпленого кутового елемента армування, де: 1 – відносне переміщення, ванта конструкції $2 \times M$, 2 – відносне переміщення, ванта конструкції $M \times M$, 3 – відносний максимальний кут зсуву матеріалу ванти, розташованого поміж елементами армування, ванти конструкції $2 \times M$, 4 – відносний максимальний кут зсуву матеріалу

Наведені залежності свідчать про те, що максимальні відносні переміщення елементів армування та зумовлені ними максимальні кути зсуву матеріалу, розташованого поміж елементами армування в розглянутому випадку менші за

значення коефіцієнту нелінійності K . Характери переміщень якісно близькі, а характеристики залежностей максимальних кутів зсуву еластичного матеріалу практично збігаються.

Розглянутий випадок розриву кутового елемента армування співставимо з випадком ушкодження максимально віддаленого від поверхні ванті середнього елемента армування ванті, складеної за схемою $M \times M$ (рис. 2).

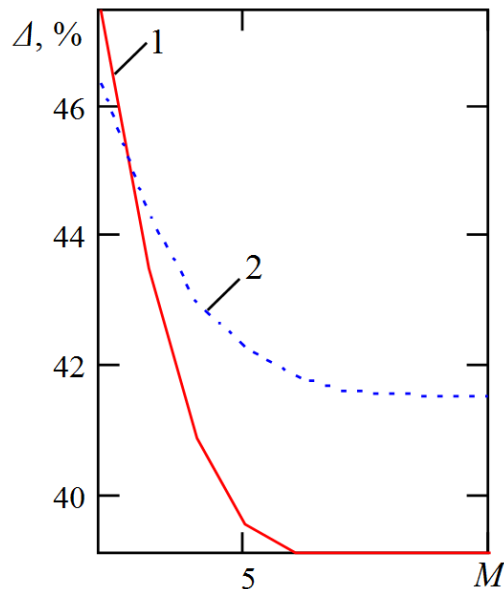


Рис. 2. Залежності показників напружено-деформованого стану Δ , зумовлених нелінійним законом зміни відношення модулів зсуву та розтягу $K = 0,5$ та з розривом центрального елемента армування, від кількості елементів армування M ванті, виготовленої за схемою $M \times M$, де: 1 – відносне переміщення, 2 – відносний максимальний кут зсуву матеріалу ванті, розташованого поміж елементами армування

Залежності показників, що характеризують залежність деформованого стану вантового каната від місця розташування зруйнованого волокна ванті, якісно збігаються. Відносні максимальні деформації зсуву більші у останньому випадку. Розрив кутового елемента та найбільш віддаленого від зовнішніх елементів армування ванті – середнього, є крайніми випадками. Це дозволяє стверджувати, що місце розташування елемента армування з розривом неперевності несуттєво впливає на характер відносного зростання деформацій ванті у разі прояву нелінійного характеру деформування еластичної оболонки. Нелінійність деформування складових ванті не впливає на перерозподіл сил у ванті з ушкодженими її елементами армування.

Висновки. Вивчені дослідження, які стосуються умов експлуатації вантових багатотросових канатів, не дозволяють встановити вплив нелінійності деформування складових ванті у разі розривів її елементів армування. На основі умов рівноваги відрізка окремого елемента армування ванті розроблено аналітичний алгоритм розрахунку напружено-деформованого стану багатотросової ванті з урахуванням її конструкції, нелінійно розподілених вздовж ванті механічних

властивостей її складових з ушкодженнями довільної групи елементів армування в одному перерізі.

Встановлено, що розрив неперервності довільного елемента армування ванти призводить до суттєвої зміни внутрішніх навантажень лише суміжних елементів армування з ушкодженням та практично не залежить від нелінійного характеру деформування складових ванти. Більші навантаження елементів армування мають місце у разі розриву кутового елемента армування, а найменші – у разі центрального.

Максимальні відносні переміщення елементів армування та зумовлені ними максимальні кути зсуву матеріалу, розташованого поміж елементами армування, менші за значення прийнятого коефіцієнта нелінійності. Характери переміщень елементів армування якісно близькі. Розроблений алгоритм дозволяє урахувати нелінійний характер деформування складових ванти на її напружений стан у разі розривів довільної кількості довільно розташованих у ванті елементів армування з розривом неперервності в одному перерізі. Алгоритм може бути застосований для визначення напружено-деформованого стану вантового каната з ушкодженнями в його перерізі, безмежно віддаленому від кінців каната.

Перелік посилань

1. Балабух, Я.А. (2010). Ефективність сталезалізобетонних автодорожніх мостів. *Дороги і мости*, 12, 16–23.
2. Боднар, Л.П., Коваль, П.М., Степанов, С.М., & Панібратець, Л.Г. (2019). Експлуатаційний стан мостів України. *Автошляховик України*, 2, 57–67.
<https://doi.org/10.33868/0365-8392-2019-2-258-57-68>
3. Ropai, V.A. (2016). *Shakhtnie uravnoveshivayushchie kanati: monografiya*. Natsionalnii gornii universitet.
4. Belmas, I., & Kolosov, D. (2011). The stress-strain state of the stepped rubber-rope cable in bobbin of winding. *Technical and Geoinformational Systems in Mining*, 211–214.
<https://doi.org/10.1201/b11586-35>
5. Cho, J. R., Yoon, Y. H., Seo, C. W., & Kim, Y. G. (2015). Fatigue life assessment of fabric braided composite rubber hose in complicated large deformation cyclic motion. *Finite Elements in Analysis and Design*, 100, 65–76.
<https://doi.org/10.1016/j.finel.2015.03.002>
6. Kwak, S.-B., & Choi, N.-S. (2009). Micro-damage formation of a rubber hose assembly for automotive hydraulic brakes under a durability test. *Engineering Failure Analysis*, 16(4), 1262–1269.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2008.08.009>
7. Ларін О.О. (2016). Прогнозування надійності гумо-кордних високонапірних муфт трубопроводів. *Вісник Хмельницького національного університету*, 4 (239), 40-46.
8. 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.
9. Танцура, Г.І. (2010). *Гнучкі тягові органи. Стикові з'єднання конвеєрних стрічок*. ДДТУ.
10. Бельмас, І., Білоус, О., Танцура, Г., Сай, О., & Гупало, Ю. (2022). Вплив пориву елемента армування на напружений стан гумотросового вантового канату. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*, (48), 42–52.
<https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2022-48-07>

11. Бельмас, І.В., Колосов, Д.Л., Онищенко, С.В., Білоус, О.І., Танцура, Г.І., & Черниш, П.В. (2022). Напружено-деформований стан композитного каната з урахуванням впливу нелінійності його деформування та розриву елемента армування. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*, 70, 99–106.
<https://doi.org/10.33271/crpnmu/70.099>

ABSTRACT

Purpose. Formulation of an algorithm for considering the influence of continuity breakages in fiber reinforcing elements on stay rope strength.

Methods. Construction and analytical solution of a mathematical model of interaction for parallel fiber reinforcing elements connected through elastic material, in a case of continuity breakage of individual elements in reinforcement.

Findings. A static strength calculation algorithm for a multi-layer stay rope with breakages in one cross-section of reinforcing elements is developed. It is established that a continuity breakage of an arbitrary element of a stay rope reinforcement leads to a significant change in internal loads of only the adjacent reinforcing elements and is practically independent of a nonlinear deformation character of cable components. Greater loads on reinforcing elements occur in a case of breakage of a corner reinforcing element, and the smallest loads – in a case of breakage of a central one. It is established that a number of rows of reinforcing elements in a stay rope and location of a damaged reinforcing element do not significantly affect displacement of cable end and do not affect distribution of loads among reinforcing elements in a damaged cross-section. Displacements depend on a ratio of shear modulus of elastic material and Young's modulus of reinforcing elements; the ratio is varied along cable length. It is established that a reinforcing element location with discontinuity does not significantly affect the character of relative growth of stay rope deformations in a case of nonlinear character of elastic shell deformation. Deformation nonlinearity of cable components does not affect redistribution of forces in stay rope with damaged reinforcing elements. Maximum relative displacements of reinforcing elements and the resulting maximum shear angles of material located between reinforcing elements are smaller than a value of the assumed nonlinearity coefficient. Characters of displacements of reinforcing elements are qualitatively similar.

Scientific novelty. An analytical algorithm is developed for calculating a stress-strain state of a multilayer stay rope considering its design, nonlinearly of mechanical properties of its components distributed along the cable with damage to an arbitrary group of reinforcing elements in one cross-section.

Practical significance. The developed algorithm allows considering a nonlinear deformation character of stay rope components on its stress state in a case of breakages in an arbitrary number of reinforcing elements arbitrarily located in a stay rope with a continuity breakage in one cross-section. The algorithm can be applied to determine a stress-stress state of a stay rope with breakage in a cross-section infinitely distant from rope ends. The algorithm allows considering the influence of breakages in reinforcing elements on rope strength, which increases rope reliability in a structure.

Keywords: *multilayer composite stay rope, stress-strain state, rope reinforcement breakage, nonlinearity of deformation character, nonlinearity of property distribution.*