

небезпечному перерізі - розраховувати на міцність спеціальну конвеєрну стрічку з регулярно розташованими отворами з урахуванням механічних властивостей складових і конструкції стрічки.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Картавий А. Н. Обґрунтування основних параметрів крутопохиленого конвеєра с притискною стрічкою для карерів з великими вантажопотоками : автореф. дис. на здобуття ступеня .канд. техн. наук: спец. 05.05.06. М. : МГГУ, 2000. 21 с.
2. Конвейери з підвісною стрічкою / В. И. Аверченков и др. М. : Машинобудування - 1, 2004. 255 с.
3. Педченко О. С. Математична модель підвісної конвеєрної стрічки на конвеєрі з вигином траси в вертикальній площині. *ГЛАБ*. М. : МГГУ. 2007. № 1. С. 322-324.
4. Бельмас І. В., Колосов Д. Л., Колосов О. Л. Дослідження напружено-деформованого стану гумотросового канату на ділянці переходу до трубчатої форми. *Вісник ПНПУ.Геологія. Нефтегазова і гірнична справа*. 2014. № 12. С. 48-55.
5. Прушак В. Я. Численная оценка долговечности соединений резиновых конвейерных лент. *Вестник Белорусского национального технического университета*. 2008. № 1. С. 35-38.
6. Бельмас І. В., Колосов Д. Л. Напружено-деформований стан плоского каната зумовлений поривами тягових елементів та конструкцією підйомної машини. *Збірник наукових праць національного гірничого університету*. Дніпро, 2017. № 50. С. 163-170.

Надійшла до редколегії 01.09.2020.

УДК 621.876.212

DOI 10.31319/2519-2884.tm.2020.19

БЕЛЬМАС І.В., д.т.н., професор,  
КОЛОСОВ Д.Л.\*, д.т.н., доцент,  
БІЛОУС О.І., к.т.н., доцент,  
ТАНЦУРА Г.І., к.т.н., доцент  
САЙ О.В., аспірант

Дніпровський державний технічний університет  
\*Дніпровська політехніка

### ВИМОГИ ДО МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСЕЙ СКЛАДОВИХ СТРІЧКИ ПІДВІСНОГО КОНВЕЄРА

**Вступ.** Для транспортування сипких матеріалів використовують підвісні конвеєри. Транспортування може здійснюватися з перепадами висот. Як правило стрічки таких конвеєрів гумотросові. Стрічка своїми краями спирається на регулярно (з постійним кроком) розташовані ролики. Дискретне спирання стрічки призводить до дискретного навантаження силами опору крайніх тягових елементів. Останнє - до нерівномірного розподілу сил по ширині стрічки, взаємного зсуву тросів, виникненню значних напружень зсуву в гумі що розташована поміж тросами. Дія екстремальних дотичних напружень призведе до відшарування тросів від гуми – виходу стрічки з ладу, значних економічних втрат. Так вартість стрічки в капітальних витратах спорудження потужного конвеєра сягає 30-50%. Зменшення екстремальних дотичних напружень в матеріалі композитної стрічки підвісного конвеєра актуальна задача. Її розв'язок дозволить збільшити ресурс стрічки.

**Постановка задачі.** Переміщення вантажів з перепадом висот здійснюють спеціальними конвеєрами [1]. Транспортування сипких матеріалів здійснюють конвеєрами на яких перерізам стрічки надають замкнутої форми [2, 3]. Стрічки спирається на періодично розташовані опори. Вони створюють силу опору та впливають на напружений стан стрічки. Перерозподіл зусиль поміж тросами в стрічках з ушкодженнями вивчено в [4, 5]. Напружено-деформований стан конвеєрної стрічки з тросами різної жорсткості досліджено в роботі [6].

Стрічка композитна – складена з тросів з'єднаних гумою. Дотичні напруження виникають в шарах гуми. Вони залежать від деформації та жорсткості гуми розташованої поміж тросами на зсув. Застосування стрічки, в якій троси в процесі виробництва стрічки з'єднані гумовими шарами різної жорсткості на зсув, дозволяє шляхом зміни жорсткості впливати на характер розподілу дотичних напружень по ширині стрічки. Добором жорсткості забезпечити більш раціональний характер розподілу напружень та, відповідно, підвищити час експлуатації стрічки підвісного конвеєра. Skorистаємося методами механіки композитних матеріалів. Побудуємо та розв'яжемо математичну модель взаємодії тросів поєднаних поміж собою оболонкою з еластичного матеріалу для стрічки підвісного конвеєра навантаженої періодично прикладеними до її країв силами опору. Врахуємо з'єднання тросів гумовими прошарками різних жорсткостей.

**Результати роботи.** Троси стрічки працюють в межах дії лінійного закону Гука. Їх жорсткість на розтяг значно більша ніж жорсткість шарів гуми що їх з'єднує. Будемо вважати, що гумові шари опираються лише взаємному зсуву суміжних тросів. Сили розтягу стрічки діють вздовж тросів. Сили опору на підвісному конвеєрі прикладені до крайніх тросів в перерізах спирання стрічки. Для спрощення задачі будемо вважати що сила опору дорівнює  $4T$ . Вона прикладена в перерізі безмежно віддаленому від кінців стрічки. Загальна сила натягнення стрічки дорівнює нулю.

Початок осі координат  $x$  розташуємо в перерізі прикладення сили. Останній по довжині розділяє стрічку на дві симетричні частини. Стрічка конвеєра виготовлена на основі тросів. Троси скручені зі стренг. Під дією зовнішнього поздовжнього зусилля кути закручування стренг тросів змінюються. В еластичній оболонці стрічки, по поверхням її приєднання до тросів, виникають моменти скручування. Для їх врівноважування конструкцією стрічки передбачена парна кількість тросів. Троси протилежного напрямку скручування розташовані по чергово. Парна кількість тросів в стрічці, симетричне, по її ширині, навантаження та вказана симетричність відносно початку осі координат дозволяє розглядати четверту частину стрічки крайній трос якої в перерізі  $x = 0$  навантажено силою  $T$ . Розподіли переміщень та внутрішніх сил навантаження тросів визначаються залежностями [6], що є розв'язками лінійної, однорідної системи рівноваги тросів побудованої методами механіки композитних матеріалів шаруватої побудови з жорсткими та м'якими шарами.

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

$$\delta_i = \sum_{m=1}^{M-1} (A_m e^{\beta_m \delta} + B_m e^{-\beta_m \delta}) \beta_m \cos(\mu_m (i-0,5)) + \dot{a} \quad (2)$$

де  $i$  – номер троса ( $1 \leq i \leq I$ );  $A_m, B_m, \dot{a}, \chi$ ; - невідомі сталі величини;

$\beta_m = \sqrt{2 \frac{G b k_G}{(t-d) E F} (1 - \cos(\mu_m))}$ ,  $\mu_m = \frac{\pi m}{M}$  - вектори характеристичних показників;

$E, F$  - зведений модуль пружності на розтяг та площа поперечного перерізу троса;  $G$  -

модуль зсуву гуми;  $t$  – крок розташування тросів в стрічці;  $d$  – діаметр тросів;  $k_G$  – коефіцієнт, що враховує форму гуми поміж тросами;  $b$  – товщина стрічки.

Величина  $a$  становить собою середнє навантаження тросів в перерізі,  $\chi$  – переміщення стрічки як жорсткого тіла. Цим переміщенням знехтуємо. Нами прийнято що стрічка безмежно довга. Переміщення, внутрішні сили навантаження тросів не можуть безмежно зростати зі зростанням координати  $x$ . Тому прийmemo.

$$A_m = 0. \quad (3)$$

Вирази (1) та (2) набудуть наступних виглядів.

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

$$\delta_i = \sum_{m=1}^{M-1} B_m e^{-\beta_m \delta} \beta_m \cos(\mu_m (i-0,5)) + \dot{a}. \quad (5)$$

В перерізі  $x = 0$  лише до першого тросу прикладене зовнішнє навантаження – сила  $T$ . Запишемо вказане в наступному вигляді.

$$\delta_i = T \begin{cases} 1 & i = 1 \\ 0 & i \neq 1 \end{cases}, \quad (1 \leq i \leq M). \quad (6)$$

Умову (6) подамо як добуток сили  $T$  та  $\delta$ -функції Дірака.

$$\delta_i = T \delta(1, M). \quad (7)$$

$\delta$ -функцію задамо сумою ряду Фур'є на обмеженій, дискретній осі координат - номерів тросів.

$$\delta(1, M) = \frac{2}{M} \sum_{m=1}^M \cos\left(\frac{\mu_m}{2}\right) \cos(\mu_m (i-0,5)) + \frac{1}{M}. \quad (8)$$

Підставимо (5) в (7). Врахуємо (8). Отримаємо значення невідомих сталих.

$$B_m = \frac{2 T}{M \beta_m} \cos\left(\frac{\mu_m}{2}\right), \quad \dot{a} = \sum_{m=1}^{M-1} \frac{T}{M \beta_m}.$$

Вирази переміщень (4) та сил (5), з урахуванням визначених сталих, набувають наступних форм.

$$u_i = -\frac{2 T}{M E F} \sum_{m=1}^{M-1} \frac{\cos(\mu_m (i-0,5))}{e^{\beta_m \delta}} \cos\left(\frac{\mu_m}{2}\right) + \sum_{m=1}^{M-1} \frac{T}{M \beta_m E F} \delta, \quad (9)$$

$$\delta_i = \frac{2 T}{M} \sum_{m=1}^{M-1} \cos\left(\frac{\mu_m}{2}\right) \frac{\cos(\mu_m (i-0,5))}{e^{\beta_m \delta}} + \sum_{m=1}^{M-1} \frac{T}{M \beta_m}. \quad (10)$$

Відомі значення переміщень тросів (9) дозволяють визначити тангенси кутів зсуву прошарків гуми поміж ними.

$$\gamma_j = \frac{u_{j+1} - u_j}{t - d}, \quad (1 \leq j \leq M - 1). \quad (11)$$

Вирази (9), (10) доводять - екстремальні значення переміщень та сил реалізуються в перерізі  $x = 0$ . В цьому перерізі найбільше навантажений перший трос та максимальні за абсолютними значеннями дотичні напруження в першому прошарку. Вплинути на ці показники можна шляхом забезпечення поміж першими двома тросами зв'язку з відмінною жорсткістю гуми на зсув. Вирази (1) та (2) отримані для стрічки регулярної побудови. В ній жорсткість прошарків гуми на зсув постійна по ширині стрічки. Відповідно, (9) та (10) прийнятні лише за вказаних умов. Врахуємо це. Введемо додаткову умовну стрічку. Для неї прийmemo вирази для переміщень та сил у формах (4) та (5). В індекси позначень невідомих величин внесемо додатковий індекс 0.

$$u_{0,i} = -\frac{1}{E F} \sum_{m=1}^{M-1} B_{0,m} e^{-\beta_m \delta c} \cos(\mu_m (i-0,5)), \quad (12)$$

$$\delta_{0,i} = \sum_{m=1}^{M-1} B_{0,m} e^{-\beta_m \delta \sqrt{c}} \beta_m c \cos(\mu_m (i-0,5)), \quad (13)$$

де  $c = \sqrt{\rho}$ ,  $\rho$  – коефіцієнт зростання жорсткості на зсув прошарків умовної стрічки.

Уявимо стрічку зі відмінною жорсткістю прошарку як складену з двох стрічок. Умова їх сумісного деформування полягає в рівності деформацій троса що належить обом стрічкам в перерізі  $x = 0$  (в перерізі контакту стрічки та опори). Позначимо цей трос як  $J$ -тий. Тоді в перерізі  $x = 0$  маємо умови.

Коли  $x=0$

$$u_J = u_{0,J}, \quad (14)$$

$$p_J = p_{0,J}. \quad (15)$$

З першої умови

$$B_{0,m} = B_m. \quad (16)$$

В перерізі  $x = 0$   $J$ -тий трос обох стрічок має сприймати рівні сили, а перший навантажено силою опору  $T$ . Відповідно умова (6) набуває наступної форми.

Коли  $x = 0$

$$\delta_i = \begin{cases} T & i = 1 \\ \delta_{0,J} & i = J \\ 0 & i \neq 1 \wedge i \neq J \end{cases}, \quad (1 \leq i \leq M). \quad (17)$$

Як і вище, скористаємося рядом Фур'є. Подамо (17) в наступному вигляді.

$$p_{i(x=0)} - \alpha = \sum_{m=1}^{M-1} B_m \beta_m \cos(\mu_m (i-0,5)) = \frac{2}{M} \sum_{m=1}^{M-1} \left( \begin{array}{l} \left( T \cos(\mu_m (1-0,5)) + \right. \\ \left. + \sum_{n=1}^{M-1} B_n \beta_n c \cos(\mu_n (J-0,5)) \right) \times \\ \left. \times \cos(\mu_m (J-0,5)) \right) \times \cos(\mu_m (i-0,5)) \end{array} \right), \quad (18)$$

$$\alpha = \frac{1}{M} \left( T + \sum_{n=1}^{M-1} B_n \beta_n c \cos(\mu_n (J-0,5)) \right). \quad (19)$$

Співвідношення сум виразу (18) становить собою систему алгебраїчних рівнянь. Запишемо її розв'язок в наступній формі.

$$B_{M-1} = \frac{T \frac{\cos(\mu_{M-1}(1-0,5))}{\cos(\mu_{M-1}(J-0,5))} + \sum_{m=1}^{M-2} B_m \beta_m c \cos(\mu_m (J-0,5))}{\frac{M B_{M-1}}{2 \cos(\mu_{M-1}(J-0,5))} - \beta_{M-1} c \cos(\mu_{M-1}(J-0,5))}, \quad (20)$$

$$B_m = \frac{T \left( \frac{\cos(\mu_m(1-0,5))}{\cos(\mu_m(J-0,5))} - \frac{\cos(\mu_{M-1}(1-0,5))}{\cos(\mu_{M-1}(J-0,5))} \right) + B_{M-1} \frac{M B_{M-1}}{2 \cos(\mu_{M-1}(J-0,5))}}{\frac{M B_m}{2 \cos(\mu_m(J-0,5))}}. \quad (21)$$

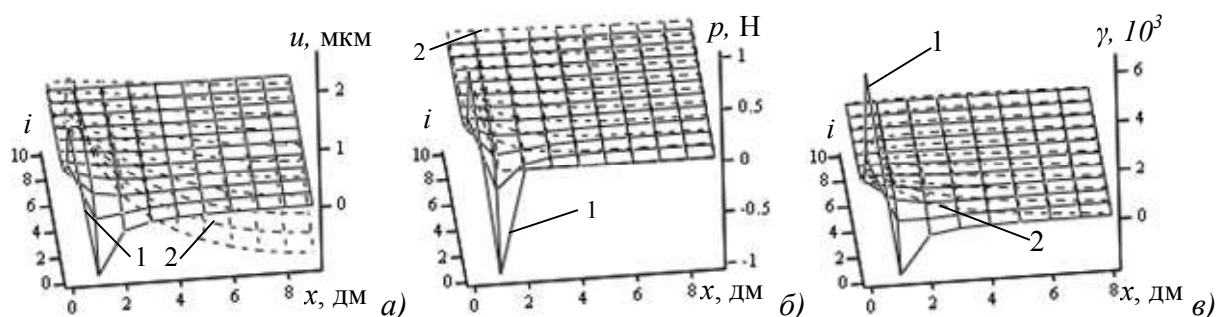
Підставимо (21) в (20). Отримаємо.

$$B_{M-1} = T \left[ \frac{\cos(\mu_{M-1}(1-0,5))}{\cos(\mu_{M-1}(J-0,5))} + \sum_{m=1}^{M-2} \frac{2}{M} \left( \frac{\cos(\mu_m(1-0,5))}{\cos(\mu_m(J-0,5))} - \frac{\cos(\mu_{M-1}(1-0,5))}{\cos(\mu_{M-1}(J-0,5))} \right) c \cos^2(\mu_m(J-0,5)) \right] \times \\ \times \left[ \beta_{M-1} \left( R - T \sum_{m=1}^{M-2} \frac{c \cos^2(\mu_m(J-0,5))}{\cos(\mu_{M-1}(J-0,5))} \right) \right]^{-1}, \quad (22)$$

де

$$R = \frac{M}{2 \cos(\mu_{M-1}(J-0,5))} - c \cos(\mu_{M-1}(J-0,5)).$$

Визначені невідомі сталі (21), (22), (19), (16) дозволяють розраховувати показники напружено-деформованого стану двох стрічок підвісного конвеєра з вирізів (12), (13) та (4), (5). При цьому деформації та навантаження  $J$  - того троса в перерізі дії зовнішнього навантаження збігаються. Напружено деформований стан стрічки з відмінною жорсткістю поміж  $J$  тросами першої частини стрічки визначається виразами (4), (5). Іншої частини - виразами (12), (13). Визначення екстремальних сил та тангенсів кутів зсуву (11) і становить алгоритм визначення впливу зміни жорсткості стрічки по її ширині. З використанням отриманих виразів розраховували напружено-деформований стан стрічки типу ГТС 3150 для умов підвісного конвеєра Уразі сили опору руху стрічки рівній одиниці. Кількість тросів в стрічці прийняли рівною двадцяти ( $2M = 20$ ). Жорсткість поміж першим та другим тросом приймали збільшеною у двічі у порівнянні з іншими тросами. Результати розрахунків наведені на наступних графіках (рис. 1).



1 – стрічка зі змінною жорсткістю, 2 – стрічка з незмінною жорсткістю  
Рисунок 1 - Переміщення а) внутрішні сили навантаження б) тросів, максимальні значення тангенсів кутів зсуву гуми поміж тросами.

Відзначимо, подовження тросів як пружних стрижнів не враховували для визна-

чення лише характеру перерозподілу переміщень в стрічках в наслідок зміни жорсткості. Наведені графічні залежності дозволяють зробити висновок що зміна жорсткості поміж тросами впливає на напружено-деформований стан стрічки підвісного конвеєра. Останній більше змінюється для перших двох тросів та двох гумових прошаків. Максимальні сили навантаження тросів не змінюються. Змінюються кути зсуву гуми поміж тросами. Напружено-деформований стан стрічки зі змінною жорсткістю локалізується на менших довжинах. Довжини ділянок їх перерозподілу практично не перевищують 0,5м. Така відстань менша за крок розташування опор конвеєра. Відповідно, прийняте припущення про безмежну довжину стрічки, прийнятне. Воно не впливає на отримані результати – максимальні сили навантаження тросів та максимальні їх переміщення.

Дослідження показало також те що менша жорсткість на зсув матеріалу поміж двома крайніми тросами ніж жорсткість зв'язків інших супроводжується нелінійним зростанням максимальних тангенсів кутів зсуву (рис.2).

Відповідно отриманого графіку зміна різниці жорсткості зв'язку тросів веде до нелінійної зміни кутів зсуву гуми. Вказане впливає на значення дотичних напружень. Разом з тим, завдяки тому що зміна тангенсів кутів зсуву менша за зміну жорсткості, екстремальні напруження зменшуються зі зростанням різниці жорсткостей прошарків. На рисунку 3 наведена відносна зменшення максимальних дотичних напружень в зразку зі змінною жорсткістю шарів гуми.

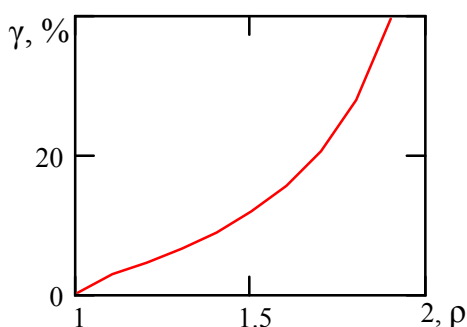


Рисунок 2 - Залежність зростання максимальних значень кута зсуву зі зростанням відношення жорсткостей прошарків гуми  $\rho$

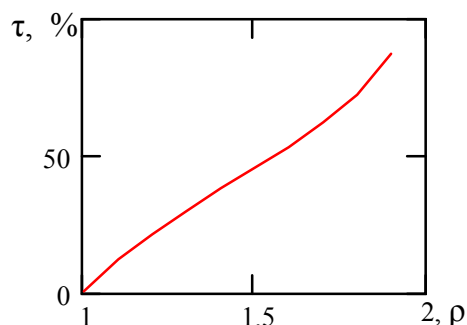


Рисунок 3 - Відносне зменшення максимальних дотичних напружень в шарах гуми

Відповідно отриманого графіка, зміна різниці жорсткостей прошарків гуми веде до зменшення екстремальних дотичних напружень. Висунута вище гіпотеза, про можливість впливу на максимальні дотичні напруження шляхом застосування стрічки з різною жорсткістю зв'язку тросів на зсув, підтверджена.

**Висновки.** Виготовлення стрічки з відмінною (зменшеною) жорсткістю зв'язку на зсув крайніх тросів дозволяє зменшити максимальні дотичні напруження в гумі стрічки підвісного конвеєра. Розроблено алгоритм визначення напружень з використанням аналітичних залежностей в замкненому вигляді. Він дозволяє розраховувати значення напружень гумотросових стрічок підвісних конвеєрів різної конструкції та з різними механічними властивостями їх складових. Змінити жорсткість зв'язку тросів на зсув можливо шляхом застосування іншої гумової суміші поміж крайніми тросами або шляхом зміни (збільшення) кроку їх розташування. Обидва ці прийоми можуть бути задіяні як окремо або як комбінація при проектуванні конвеєра або під час підготовки ремонтної документації до ремонту. Їх використання забезпечує збільшення часу її експлуатації.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Картавий А. Н. Обґрунтування основних параметрів крутопохиленого конвеєра с притискною стрічкою для кар'єрів з великими вантажопотоками : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.05.06. М., 2000. 21 с.
2. Педченко О. С. Математична модель підвісної конвеєрної стрічки на конвеєрі з вигином траси в вертикальній площині. *ГІАБ. М. : МГГУ. 2007. № 1. С 322-324.*
3. Бельмас І. В., Колосов Д. Л., Колосов О. Л. Дослідження напружено-деформованого стану гумотросового канату на ділянці переходу до трубчатої форми. *Вісник ПННПУ. Геологія. Нефтегазова і гірнична справа. 2014. № 12. С. 48-55.*
4. Волоховский В. Ю., Радін В. П., Рудяк М.Б. Концентрація зусиль в тросах и спроможність гумотросових конвеєрних стрічок з пошкодженнями. *Вісник МЕІ. 2010. № 5. С. 5-12.*
5. Бельмас І. В. Напружений стан гумотросові стрічки за довільного пошкодження тросів. *Проблеми машинобудування та надійності машин. 1993. № 6. С. 45-48.*
6. Belmas I., Kolosov D., Kolosov O., Onvshchenko S. Stress-strain state of a conveyor belt with cables of different rigidity and their breakages (Напружено-деформований стан конвеєрної стрічки з тросами різної жорсткості та з ушкодженнями). *Fundamental and applied researches in practice of leading scientific schools. 2018. Vol. 26, № 2. С 231-39.*

Надійшла до редколегії 09.09.2020.

УДК 622.673

DOI 10.31319/2519-2884.tm.2020.20

БЕЛЬМАС І.В., д.т.н., професор,  
КОЛОСОВ Д.Л.\*, д.т.н., доц.,  
БІЛОУС О.І., к.т.н., доц.,  
ТАНЦУРА Г.І., к.т.н., доц.  
ГУПАЛО Ю.Ю., аспірантка

Дніпровський державний технічний університет  
\*Дніпровська політехніка

### ВПЛИВ ДЕФЕКТУ ПРИЄДНАННЯ ВАНТОВОГО КАНАТУ НА ЙОГО НАПРУЖЕНИЙ СТАН

**Вступ.** Розвиток будівельної галузі супроводжується впровадженням нових технічних рішень та матеріалів, зокрема, структурно-вантових сталезалізобетонних елементів перекриття будівель [1] - спеціальних конструкції для перекриття будівельних споруд, виготовлених з декількох різних матеріалів. В такому покритті вантові канати з'єднані з сталезалізобетонними блоками. Ванти в таких спорудах мають бути максимально захищені від впливу довкілля та мати високу надійність. Захист від зовнішнього впливу можна забезпечити спеціальними покриттями. Підвищення надійності - шляхом резервування з використанням паралельно приєднаних додаткових елементів. Сумістити вказані способи покращення споживчих властивостей канату можна шляхом паралельного розташування в еластичній оболонці системи тросів. Такий багатотросовий вантовий канат має бути приєднаний до залізобетонного покриття. З'єднання будь яких деталей, конструктивних елементів неминуче супроводжується похибками виготовлення та складання.

Внаслідок похибок можливі наступні зміщення перерізу приєднання канату до конструкції. Зміщення перерізу приєднання канату вздовж та нормально до його осі, поворот навколо осі канату (скручування), його згин в площині канату. Зміщення