

10. Берукштис Г. К., Кларк Г. Б. Коррозионная устойчивость металлов и металлических покрытий в атмосферных условиях. М. : Наука, 1971. 159 с.
11. Розенфельд И. Л. Коррозия и защита металлов. М. : Металлургия, 1969. 448 с.
12. Кеше Г. Коррозия металлов. Физико-химические принципы и актуальные проблемы: пер. нем. М. : Металлургия, 1984. 406 с.
13. Фишман Б. П., Фрисман И. А., Сержантов В. А., Монархов В. В. Защита от коррозии конструкций и оборудования металлургических цехов. К. : Техника, 1983. 216 с.
14. Курдюмов Г. В. Явление закалки и отпуска стали. М. : Металлургия, 1960. 64 с.

Надійшла до редколегії 09.09.2020.

УДК 621.876.212

DOI 10.31319/2519-2884.tm.2020.18

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  
БОБИЛЬОВА І.Т., асистент

Дніпровський державний технічний університет  
\*Дніпровська політехніка

### **АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ НА МІЦНІСТЬ КОНВЕЄРНОЇ СТРІЧКИ З ОТВОРАМИ**

**Вступ.** Конвеєрні стрічки широко застосовують в транспортному машинобудуванні. Вони сприймають зусилля розтягу та мають систему паралельних стрічки регулярно розташованих тягових елементів. Останні з'єднані в єдину конструкцію – стрічку еластичною оболонкою (матрицею). Конвеєрні стрічки можуть бути використані в машинах для просіювання матеріалів. На конвеєрах можливе поєднання технологічних операцій. Прикладом може бути стрічка транспортування та паралельного часткового відведення води зі зволоженої грудкуватої маси. Для цього в стрічці достатньо виконати отвори.

Утворення отворів змінює її побудову. Змінюється механізм взаємодії тягових елементів. Змінюється розподіл внутрішніх сил поміж ними. Виникають дотичні напруження в оболонці стрічки. Зменшується тягова спроможність стрічки. Різноманітність технологічних вимог призводить до різноманітності схем армування стрічки, розривів їх неперервності і вимагає Дослідження напружено-деформованого стану (НДС) стрічки, армованої подовжніми тяговими елементами з розривами неперервності та розробки алгоритму розрахунку на міцність конвеєрної стрічки з отворами.

**Постановка задачі.** До технологічних процесів пристосовані спеціальні конвеєри: крутопохилі [1], з підвісною стрічкою [2, 3], трубчаті [4]. Вони обладнані композитними стрічками. Розриви суцільності елементів армування призводять до зменшення міцності стикових з'єднань стрічок [5]. Властивості стикових з'єднань вживаних стрічок досліджені в роботі [6]. В них не досліджувалася взаємодія елементів армування з періодичними частковими видаленнями окремих з них і відомі алгоритми визначення НДС плоскої конвеєрної стрічки не можуть бути застосовані для визначення тягової спроможності стрічки з систематично розташованими отворами.

Стрічки мають систему паралельних, розташованих вздовж стрічки тягових елементів. По ширині стрічки вони укладені з незмінним кроком та з'єднані в єдину конс-

трукцію еластичною оболонкою - матрицею. Стрічка як носійнотяговий елемент навантажена силами розтягу. Подовжні деформації елементів її армування значно більші ніж їхні деформації в площині стрічки. Еластична матриця стрічки як композитного матеріалу працює практично лише на зсув. Врахуємо наведене, розглянемо фрагмент стрічки як композит регулярної побудови з жорсткими елементами армування.

Механічні властивості стрічки, включно і її тягова спроможність, залежать від кількості, взаємного розташування, механічних властивостей елементів армування та матеріалу матриці, розподілу внутрішніх сил поміж елементами армування. Розподіл зусиль поміж ними статично не може бути статично визначений. Створення отворів в таких стрічках пов'язане з частковим видаленням елементів армування, зменшенням її тягової спроможності. В роботі ставиться задача сформулювати алгоритм розрахунку на міцність конвеєрної з стрічки з отворами за довільних розмірів отворів, довільної їх кількості та кількості тягових елементів, властивостей складових стрічки.

**Результати роботи.** Отвори в стрічці виконують регулярно розташованими. Для більшої міцності та надійності стрічки отвори виконують так аби вони не порушували міцність окремих груп елементів армування стрічки. Регулярність розташування отворів супроводжується регулярністю НДС стрічки. Для визначення такого стану розглянемо четверту частину періодично повторювального фрагменту стрічки. Нехай до його складу входять  $M+N$  елементів армування. Довжини останніх позначимо  $l_1, l_2$ . На частині фрагменту довжиною  $l_2$  видалено розташовані з краю стрічки  $N$  елементів. Фрагмент навантажено силою  $P$ . В наслідок симетрії та навантаження фрагменту його контури залишаються прямолінійними в процесі деформування стрічки.

Переміщення елементів армування (ЕА) сили їх навантаження в стрічці композитної побудови незмінної конструкції визначаються наступними залежностями [6] отриманими з умови рівноваги окремого елемента армування елементарної довжини в стрічці.

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

$$p(i, x) = \frac{1}{E F} \sum_{n=1}^{M-1} (A_n e^{\beta_n x} - B_n e^{-\beta_n x}) \cos(\mu_n (i-0,5)) + \frac{P x}{Z E F} + c, \quad (2)$$

де  $u(i, x)$  - переміщення  $i$ -того троса ( $1 \leq i \leq Z$ ) в перерізі  $x$ ;  $A_n, B_n, c$  - невідомі сталі;

$\mu_n = \frac{\pi n}{Z}$ ;  $\beta_n = \sqrt{\frac{2 G k_G}{(t-d) E F} (1 - \cos(\mu_n (i-0,5)))}$ ;  $Z, d, t$  - кількість, діаметр та крок ук-

ладення ЕА в частині;  $G$  - приведений модуль зсуву матеріалу еластичної оболонки стрічки;  $E, F$  - зведений модуль пружності на розтяг та площа перерізу елемента армування стрічки;  $k_G$  - коефіцієнт впливу форми матеріалу частини матеріалу оболонки розташованої поміж ЕА.

Порушення цілісності ЕА призводить до порушення структури фрагменту, що виключає можливість безпосереднього використання виразів (1) та (2). Скористаємося методом перерізів. По перерізу зміни кількості елементів армування у фрагменті розділимо фрагмент стрічки на дві частини. В межах кожної з частин конструкція фрагменту незмінна. Це забезпечує можливість застосувати вирази (1) та (2). Для першої кількості елементів армування ( $Z$ ) дорівнює  $M+N$ . Для другої -  $Z=M$ . НДС усього фрагменту можна визначити якщо забезпечити умову сумісності деформування обох частин та умови навантаження границь фрагменту.

Частинам надамо номери 1 та 2. Номери помістимо в індекси величин, що відносяться до відповідних частин фрагменту. Початок осі  $x$  сумістимо з межею частин. Не-

хай деформації на краях фрагменту задані функціями номерів елементів армування на дискретній осі цих номерів.

$$f_1(i) = \sum_{n=1}^{M+N} F_{1,n} \cos(\mu_{1,n}(i-0,5)) \quad \text{та} \quad f_2(i) = \sum_{n=1}^M F_{2,n} \cos(\mu_{2,n}(i-0,5)).$$

Граничні умови:

в перерізі  $x = -l_2$

$$u_{2,i} = f_2(i), \quad \sum_{i=1}^M p_i = P, \quad (3)$$

в перерізі  $x = l_1$

$$u_{1,i} = f_1(i), \quad \sum_{i=1}^{M+N} p_i = P, \quad (4)$$

де  $p_i$  - сила розтягу  $i$  - того елемента армування.

Умови сумісності деформування частин в перерізі  $x = 0$  відтворюють умову рівності сил та переміщень елементів армування, що не мають розривів неперервності та відсутність навантажень тих елементів що не мають свого продовження за межами першої частини.

$$u_{1,i} = u_{2,i} \quad (1 \leq i \leq M), \quad (5)$$

$$p_{1,i} = p_{2,i} \quad (1 \leq i \leq M), \quad (6)$$

$$p_{1,i} = 0 \quad (M < i \leq N + M). \quad (7)$$

З граничних умов (3) та (4) маємо наступні співвідношення.

$$A_{1,n} = (F_{1,n} - B_{1,n} e^{-\beta_{1,n} l_1}) e^{-\beta_{1,n} l_1}, \quad (8)$$

$$A_{2,n} = (F_{2,n} - B_{2,n} e^{\beta_{2,n} l_2}) e^{\beta_{2,n} l_2}. \quad (9)$$

Отримані співвідношення дозволяють зменшити кількість невідомих у виразах для переміщень та внутрішніх навантажень ЕА фрагментів.

$$u_\rho(i, x) = \sum_{n=1}^{Z_\rho-1} \left( \frac{F_{\rho,n} e^{-\beta_{\rho,n} l_\rho} e^{\beta_{\rho,n} x} + B_{\rho,n} \times}{\times (e^{-\beta_{\rho,n} x} - e^{-2\beta_{\rho,n} l_\rho} e^{\beta_{\rho,n} x})} \cos(\mu_{\rho,n}(i-0,5)) \right) + \frac{Px}{Z_\rho E F} + c_\rho, \quad (10)$$

Коефіцієнт  $c_1$  приймемо рівним нулю. Тоді

$$\tilde{n}_2 = u_1(i, 0), \quad (1 \leq i \leq M).$$

Номери ЕА будемо розглядати як дискретну вісь координат. Внутрішні сили, що виникають в елементах армування першої частини, запишемо у формі ряду Фур'є на відрізьку  $(0 < i < M+N+1)$ .

$$p_1(i, x) = \frac{2 E F}{M + N} \sum_{m=1}^{M+N-1} \left[ \begin{aligned} & \sum_{n=1}^{M-1} \left( F_{2,n} e^{\beta_{2,n} l_2} + B_{2,n} (1 - e^{2\beta_{2,n} l_2}) \right) \times \\ & \sum_{j=1}^M \cos(\mu_{2,n}(j-0,5)) \cos(\mu_{1,m}(j-0,5)) \times \\ & + \sum_{j=M+1}^{M+N} B_{1,j} \cos(\mu_{1,m}(j-0,5)) \end{aligned} \right] \times \left( \frac{e^{-\beta_{1,m} l_1} e^{\beta_{1,m} x} + e^{-\beta_{1,m} x}}{e^{-\beta_{1,m} l_1} - 1} \right) \cos(\mu_{1,m}(i-0,5)) + \frac{P}{M + N} \quad (11)$$

Внутрішні сили навантаження ЕА другої ділянки визначимо з виразу (6), врахувавши (9) Гука.

$$p_2(i, x) = \sum_{n=1}^{M-1} \left( F_{2,n} e^{\beta_{2,n} l_2} e^{\beta_{2,n} x} - B_{2,n} \left( e^{-\beta_{2,n} x} - e^{2\beta_{2,n} l_2} e^{\beta_{2,n} x} \right) \right) \times \cos(\mu_{2,n}(i-0,5)) E F + \frac{P}{M} \quad (12)$$

Прийняті форми рішень забезпечують виконання умови (5) - (7) дозволяють побудувати систему алгебраїчних рівнянь порядку  $M+N-1$ . Відзначимо, вирази значень внутрішніх сил (10) та (11), мають по дві складові. Перша залежить від номера троса та від значення координати  $x$ . Друга - стала величина. Сума сил, визначених лише першими складовими, дорівнює нулю. Це дозволяє не задавати умову відсутності навантаження для одного з елементів армування з номером більшим за  $M$ . Умова буде виконана автоматично. Порядок  $M+N-1$  системи рівнянь достатній для визначення усіх невідомих сталих.

Визначені сталі дозволяють визначити розподіл сил поміж елементами армування та їх переміщення. Переміщення - визначати дотичні напруження, що передаються еластичною оболонкою розташованою поміж ЕА. Міцність фрагменту визначається максимальними навантаженнями ЕА та дотичними напруженнями в матриці. Аналіз розподілів сил показує, що максимально навантажений кожен неперервний елемент армування стрічки суміжний з отвором. Внутрішня сила його навантаження.

$$p_{\max} = \sum_{n=1}^{M-1} \left( F_{2,n} e^{\beta_{2,n} l_2} - B_{2,n} \left( 1 - e^{2\beta_{2,n} l_2} \right) \right) \cos\left(\frac{\pi n}{2M}\right) (-1)^n E F + \frac{P}{M} \quad (13)$$

Найбільший взаємний зсув елементів армування спостерігається поміж неперервним елементом та суміжним з ним елементом з розивом неперервності. Екстремальне значення відносного зсуву в перерізі закінчення елементів армування. Екстремальні зсуви спричиняють екстремальні (максимальні) дотичні напруження. Екстремальний тангенс кута зсуву еластичного матеріалу розташованого поміж елементами армування визначається залежністю.

$$\gamma_{\max} = \sum_{n=1}^{M+N-1} \left( F_{1,n} e^{-\beta_{1,n} l_1} + B_{1,n} \left( 1 - e^{-2\beta_{1,n} l_1} \right) \right) \beta_{1,n}^{-1} \times \cos\left(\mu_{1,n}\left(M - \frac{1}{2}\right)\right) - \cos\left(\mu_{1,n}\left(M + \frac{1}{2}\right)\right) \quad (14)$$

Нами розраховано напружено-деформований стан стрічки з діаметром та кроком розташування елементів армування 1 мм та 1,2 мм, відповідно. Довжину отвору приймали рівною 200 мм. Крок розташування отворів 400 мм. Кожний отвір утворено видаленням частини дванадцяти елементів армування. Між отворами дванадцять неперервних елементів. Визначені внутрішні сили навантаження, переміщення ЕА, значення тангенсів кутів зсуву матеріалу матриці стрічки.

Аналіз результатів показав що більш суттєво по довжині стрічки змінюються внутрішні навантаження цілих ЕА та суміжних з ними елементів з розривами неперервності. В матеріалі матриці стрічки між цими елементами виникають максимальні дотичні напруження. Поперечні перерізи стрічки, що проходять по краям отворів є небезпечними, з токи зору міцності стрічки, перерізами. Ці перерізи найбільше втрачають прямолінійність в процесі навантаження стрічки.

**Висновки.** Сформульований алгоритм визначення величини розподілів внутрішніх сил навантажень елементів армування та кутів зсуву еластичної оболонки розташованого поміж елементами армування стрічки за довільної схеми розташування та розмірів отворів побудовано на основі моделі взаємодії ЕА та її розв'язано аналітичним шляхом. Вирази (13) та (14) дозволяють визначати максимальні сили та напруження в

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 вигинном траєкторії в вертикальній площині. *ГІАБ*. 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 трубчастої 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.