

ние эксцентриситетов средних роликов опор учитывается граничными условиями.

Колебания ленты происходят относительно линии динамического провеса, которая является траекторией движения ленты, находящейся под действием погонной нагрузки и центростремительных сил. Уравнение линии динамического провеса определяется из общего уравнения (11) при условии отсутствия колебаний.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Каудерер Г. Нелинейная механика. – М.: Изд. иностр. лит., 1961. – 778 с.  
 2. Панкратов С.А. Основы динамического расчета ленточных конвейеров. Труды Ун-та дружбы народов им. П.Лумумбы. Т. 13, вып. I, 1976. – С. 89-98.

3. Панкратов С.А., Келен О.И., Цветков В.Б. Расчет ленточных конвейеров на надежность и долговечность. Горные машины и автоматика, 1965, №2 – С. 21-26.  
 4. Панкратов С.А., Цветков В.Б. О резонансных колебаниях конвейерных лент. Горные машины и автоматика. 1965, № 5.  
 5. Панкратов С.А. Динамика машин для открытых горных и земляных работ. – М.: Машиностроение, 1967 – 448 с.  
 6. Светлицкий В.А. Передачи с гибкой связью. – М.: Машиностроение, 1967. – 156 с.  
 7. Светлицкий В.А., Стасенко И.В. Сборник задач по теории колебаний. – М.: Высшая школа, 1973. – 454 с.  
 8. Светлицкий В.А. Случайные колебания механических систем. – М.: Машиностроение, 1976. – 216 с.  
 9. Светлицкий В.А. Механика гибких стержней и нитей. – М.: Машиностроение, 1978. – 224 с.

УДК 621.867.2

**Миранович О.Л.**

**ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ МЕЖДУ РЯДАМИ СКОБ, СОЕДИНЯЕМЫХ КОНВЕЙЕРНУЮ ЛЕНТУ**

**Введение**

Неравномерное распределение нагрузки между рядами скоб приводит к ограничению прочности и долговечности стыкового соединения, необходимости устанавливать дополнительные «страхующие» ряды скоб, что увеличивает трудозатраты на стыковку. Прочность стыковых соединений с П-образными скобами составляет около 70% прочности ленты.

**Аналитические исследования**

Рассмотрим возможность выровнять нагрузку между рядами скоб при отсутствии клеевого соединения. Целью выравнивания нагрузки является повышение несущей способности соединения с заданным числом рядов или заданным числом скоб за счет нагружения элементов соединения, близкого предельно допустимому. При этом задача выравнивания нагрузки может быть представлена в оптимизационной и алгебраической постановках.

Задача оптимизации заключается в поиске оптимальных значений параметров соединения  $M_k$ ,  $I_{mi}$ ,  $d_k$  и  $l_i$ , обеспечивающих экстремум целевой функции, например, при заданных ограничениях  $\sigma_i < [\sigma]$ ,  $S_{mi} < [S_C]$ . При условии, что усилия, возникающие в упругих элементах соединения  $X_1, X_2, \dots, X_{N_p}$  одинаковы, математическая модель примет вид

$$\left. \begin{aligned} F &= \Omega_1 \sum_i \sum_j (\sigma_i - \sigma_j)^2 + \Omega_2 \sum_i \sum_j \sum_m \sum_k (S_{mi} - S_{kj})^2; \\ X_1 N_p &= P, \\ X_1 \left[ -C_1 + \sum_{j=2}^k \sum_{i=1}^{j-1} (\delta_{1i} + \delta_{2i}) + (N_p - k) \sum_{i=1}^{k-1} (\delta_{1i} + \delta_{2i}) + C_k \right] &= \\ &= P \sum_{i=1}^{k-1} \delta_{2i}; \\ C_k &= C_1 - \sum_{j=2}^k \sum_{i=1}^{j-1} (\delta_{1i} + \delta_{2i}) - (N_p - k) \sum_{i=1}^{k-1} (\delta_{1i} + \delta_{2i}) + \\ &+ N_p \sum_{i=1}^{k-1} \delta_{2i}, \quad k = 2, 3, \dots, N_p \end{aligned} \right\} (1)$$

где  $M_k$  – число скоб в  $k$ -м ряду,  $I_{mi}$  – число прокладок на участке  $i$  ленты  $m$ -го конца,  $d_k$  – диаметр ножек скоб  $k$ -го ряда,  $l_i$  – расстояние между  $i$  и  $i+1$  рядами скоб, мм,  $\sigma_i$  – наибольшие нормальные напряжения в скобах  $i$ -го ряда,  $[\sigma]$  – допускаемые нормальные напряжения в скобах,  $S_{mi}$  – наибольшие контактные напряжения взаимодействия скобы  $i$ -го ряда с  $m$ -м концом ленты,  $\Omega_1, \Omega_2$  – весовые коэффициенты,  $P$  – растягивающее усилие, Н,  $C_k$  – податливость  $k$ -го ряда скоб, м/Н.

При заданном числе скоб  $M_0$  к варьируемым параметрам следует добавить число рядов  $N_p$ , а к ограничениям – условие  $\sum_k M_k = M_0$ .

В таблице 1 приведены найденные численно оптимальные параметры двенадцатирядного соединения с тремя типами скоб, обеспечивающие минимум целевой функции (1) при варьировании податливостей рядов скоб.

**Таблица 1.** Оптимальные параметры 12-рядного соединения

$C_1/\delta_1$	4,0	8,0	12,0	16,0
$k_2$	2	2	2	4
$C \times 2$	0,3	0,5	0,6	0,6
$k_3$	8	8	8	6
$C \times 3$	0,05	0,15	0,25	0,15
$\lambda$	1,22	1,25	1,26	1,26

**Примечание.**  $k_2$  и  $k_3$  – число рядов скоб второго и третьего типа,  $C \times 2$  и  $C \times 3$  – отношения податливостей рядов скоб второго и третьего типа к податливости крайнего ряда скоб,  $C \times 2 = C_2/C_1$ ,  $\lambda$  – коэффициент уменьшения величины максимального усилия по сравнению с соединением, имеющим одинаковые ряды скоб с податливостью  $C_1$ ,  $\delta_{mi} = \delta = const$ .

Из формулы (1, 4-я формула) следует, что равномерное распределение нагрузки между рядами можно осуществить путем уменьшения податливости, внутренних рядов скоб по сравнению с крайними рядами. Так, для пятирядного симметричного стыка ( $\delta_{11} = \delta_{21} = \delta_{14} = \delta_{24}$ ) и ( $\delta_{12} = \delta_{22} = \delta_{13} = \delta_{23}$ ) податливости рядов скоб должны быть следующими:

$$\begin{aligned} C_2 &= C_4 = C_1 - 3\delta_{11}, \\ C_3 &= C_1 - 3\delta_{11} - \delta_{12}, \\ C_5 &= C_1. \end{aligned}$$

При одинаковых участках ленты между рядами скоб ( $\delta_{mi} = \delta_{mj}$  и  $m = 1, 2$ ) необходимая податливость каждого ряда скоб определяется формулой

$$C_k = C_1 - \left[ 2 \sum_{j=2}^k (k-j+1) + (N_p - 2k)(k-1) \right] \delta_{11}, \quad (2)$$

$$k = 2, 3, \dots, N_p.$$

Согласно формуле (2) для восьмьрядного соединения необходимы следующие податливости рядов:

$$\begin{aligned} C_2 &= C_7 = C_1 - 6\delta_{11} \\ C_4 &= C_5 = C_1 - 12\delta_{11} \\ C_3 &= C_6 = C_1 - 10\delta_{11} \\ C_8 &= C_1. \end{aligned}$$

Формула (2) и приведенные расчеты показывают, что с увеличением числа рядов в соединении разность податливостей средних и крайних рядов скоб также должна увеличиваться. Однако полное выравнивание нагрузки между рядами возможно только для соединений, число рядов которых  $N_p$  удовлетворяет неравенству

$$N_1(N_p - 1) = 2N_p! + 2 \left\langle \frac{C_1}{\delta_{11}} \right\rangle, \quad (3)$$

где  $N_1 = \frac{N_p}{2}$  для четных  $N_p$  и  $N_1 = \frac{N_p + 1}{2}$  для нечетных  $N_p$ .

Изменение податливости рядов скоб целесообразно осуществить изменяя диаметр проволоки скоб, оставляя при этом неизменным число скоб в ряду. Это позволяет выравнивать нагрузку не только между рядами, но и между отдельными скобами.

Диаметр проволоки для скобы  $k$ -го ряда определим следующим образом:

$$d_k = \left\{ \frac{\frac{2k_g H_1^3}{3\pi E_c M_k}}{\left[ C_1 - 2\delta \sum_{j=2}^k (k-j+1) - \delta(N_p - 2k)(k-1) \right]} \right\}^{0,25} \quad (4)$$

Для клеомеханического соединения распределение суммарного усилия  $X_{\mathcal{A}k}$  равно

$$\sum_{i=1}^{N_p} X_{\mathcal{A}i} = P,$$

$$\begin{aligned} X_{\mathcal{A}k} C_{\mathcal{A}k} - X_{\mathcal{A}1} C_{\mathcal{A}1} + \sum_{j=2}^k X_{\mathcal{A}j} \sum_{i=1}^{j-1} (\delta_{li} + \delta_{2i}) + \\ + \sum_{j=k+1}^{N_p} X_{\mathcal{A}j} \sum_{i=1}^{k-1} (\delta_{li} + \delta_{2i}) = P \sum_{i=1}^{k-1} \delta_{2i}. \end{aligned} \quad (5)$$

Запишем отдельно распределение усилий  $X_k$  и  $X_{kn}$ .

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{N_p} X_i a_i = P, \\ X_k a_k C_{\mathcal{A}k} - X_1 a_1 C_{\mathcal{A}1} + \sum_{j=2}^k X_j a_j \sum_{i=1}^{j-1} (\delta_{li} + \delta_{2i}) + \\ + \sum_{j=k+1}^{N_p} X_j a_j \sum_{i=1}^{k-1} (\delta_{li} + \delta_{2i}) = P \sum_{i=1}^{k-1} \delta_{2i}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $a_k = 1 + \frac{C_k}{C_{nk}}$ .

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{N_p} X_i b_i = P, \\ X_{nk} b_k C_{\mathcal{A}k} - X_{n1} b_1 C_{\mathcal{A}1} + \sum_{j=2}^k X_{nj} b_j \sum_{i=1}^{j-1} (\delta_{li} + \delta_{2i}) + \\ + \sum_{j=k+1}^{N_p} X_{nj} b_j \sum_{i=1}^{k-1} (\delta_{li} + \delta_{2i}) = P \sum_{i=1}^{k-1} \delta_{2i}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $b_k = 1 + \frac{C_{nk}}{C_k}$ .

Податливость участков клеевой прослойки  $C_{nk}$  практически очень сложно регулировать. Поэтому в уравнениях (5) – (7) варьируемыми параметрами остаются  $C_k$  и  $\delta_{mi}$ . В этой связи выравнивание усилий  $X_{\mathcal{A}k}$  не обеспечивает выравнивания усилий в скобах и клеевом слое.

Параметры клеомеханических соединений, обеспечивающие выравнивание усилий и в скобах, и в клее, определяются системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^{N_p} \left( \frac{C_i}{C_{ni}} + 1 \right) &= N_p, \\ C_k - C_1 + \sum_{j=2}^k \left( \frac{C_j}{C_{nj}} + 1 \right) \sum_{i=1}^{j-1} (\delta_{li} + \delta_{2i}) + \\ + \sum_{j=k+1}^{N_p} \left( \frac{C_j}{C_{nj}} + 1 \right) \sum_{i=1}^{k-1} (\delta_{li} + \delta_{2i}) &= N_p \sum_{i=1}^{k-1} \delta_{2i}, \\ \sum_{i=1}^{N_p} \left( \frac{C_{ni}}{C_i} + 1 \right) &= N_p, \\ C_{nk} - C_{n1} + \sum_{j=2}^k b_j \sum_{i=1}^{j-1} (\delta_{li} + \delta_{2i}) + \\ + \sum_{j=k+1}^{N_p} \sum_{i=1}^{k-1} (\delta_{li} + \delta_{2i}) &= N_p \sum_{i=1}^{k-1} \delta_{2i}, \quad k = 2, 3, \dots, N_p \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Рассмотрим возможность выравнивать нагрузку между одинаковыми рядами скоб. Для этого подставим в уравнения (1, строка 4)  $C_k = C_1$  и получим систему уравнений, определяющую соотношение податливостей участков ленты

$$\sum_{j=2}^k \sum_{i=1}^{j-1} \delta_{i1} + (N_p - k) \sum_{i=1}^{k-1} \delta_{i1} = k \sum_{i=1}^{k-1} \delta_{2i} - \sum_{j=2}^k \sum_{i=1}^{j-1} \delta_{2i},$$

$$k = 2, 3, \dots, N_p.$$

После преобразований уравнение принимает вид

$$\frac{\delta_{i1}}{\delta_{2i}} = \frac{i}{N_p - i}, \quad (9)$$

$$i = 1, 2, \dots, N_p - 1.$$

Выразим податливость через число прокладок  $I_{1i}, I_{2i}$   $i$ -го участка

$$\frac{I_{1i}}{I_{2i}} = \frac{N_p - i}{i}, \quad (10)$$

$$i = 1, 2, \dots, N_p - 1.$$

Если один конец ленты разделан ступенчато ( $I_{2i} = i$ ), то для выравнивания нагрузки другой конец также должен быть ступенчатым, причем, симметрично первому

$$I_{1i} = (N_p - i).$$

Из последней формулы видно, что число участков, нагрузка между которыми выравнена, не может превышать число прокладок цельной ленты. Поэтому у многорядных соединений на каждом таком участке может размещаться несколько рядов скоб. При этом выравнивать нагрузку между рядами скоб каждого участка возможно изменяя диаметр проволоки скоб в соответствии с формулой (4).

Рассмотрим также возможность выравнивания нагрузки между отдельными скобами. Если  $X_k = \alpha_C M_k$  и  $C_k = \beta_C / M_k$ , где  $\alpha_C$  – усилие, передаваемое одной скобой, а  $\beta_C$  – податливость одной скобы, то система уравнений (1, строка 2-3) принимает вид:

$$\sum_{j=1}^{N_p} M_j = \frac{P}{\alpha_C},$$

$$\sum_{j=2}^k M_j \sum_{i=1}^{j-1} (\delta_{i1} + \delta_{2i}) + \sum_{j=k+1}^{N_p} \sum_{i=1}^{k-1} (\delta_{i1} + \delta_{2i}) = P \sum_{i=1}^{k-1} \frac{\delta_{2i}}{\alpha_C} \quad (11)$$

При  $\delta_{i1} = \delta_{2i} = \delta$  решение системы (11) имеет вид

$$M_1 = M_{N_p} = \frac{P}{2}, \quad M_k = 0 \text{ для } k = 2, 3, \dots, N_p - 1.$$

**Выводы**

Выравнивание нагрузки между отдельными скобами невозможно при одинаковой податливости участков лент между рядами. Проведенные исследования показали, что обеспечить полное выравнивание усилий, воспринимаемых скобами, и уси-

лий взаимодействия скоб с лентой при разделанных или неразделанных концах лент, варьируя только  $M_k, I_{mi}, d_k$  невозможно. Либо скобы, либо концы лент, либо те и другие будут нагружены не соответственно их прочности. Большая часть скоб останется недогруженной до предельных напряжений.

Разделка концов лент согласно (10) в связи с ограниченным числом прокладок может быть использована для выравнивания нагрузки между группами рядов при условии, что прочность разделанных концов достаточна для длительного сопротивления прорыванию скобами прокладок.

Существенно уменьшить неравномерность распределения нагрузки можно применением двух или трех типоразмеров скоб с податливостями, определяемыми формулой (2) при  $k = 2, 3$ . Так, применение в стыковых соединениях, вместо одного двух типоразмеров скоб, позволяет уменьшить величину наибольшего усилия в 1,1 – 1,25 раза, трех типоразмеров в 1,15 – 1,35 раза и соответственно увеличить несущую способность соединения на 20 % – 40 %.

Другим способом уменьшить неравномерность нагрузки на скобы является использование соединения лент, содержащего разрезанные на продольные полосы концы лент. Полосы концов поочередно (сверху и снизу) наложены друг на друга и соединены рядами скоб, наклоненных в сторону, противоположную растяжению концов (рис. 1). Под действием сил натяжения полосы концов деформируются, смещаясь вдоль скоб, и плотно прижимаются друг к другу. Деформационные смещения соединяемых полос обеспечивают повышение прочности соединения за счет выравнивания нагрузки между скобами и появления сил трения в контакте.

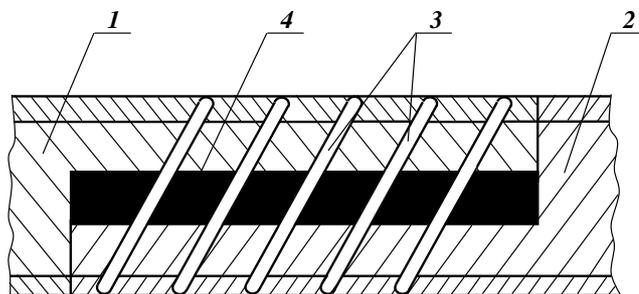


Рис. 1. Соединение с наклонными скобами (1, 2 – полосы концов ленты; 3 – скобы; 4 – прокладка ленты)

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Инструкция по выбору, монтажу и эксплуатации конвейерных лент. – М.: НИИРП, 1981. – 75 с.
2. Конвейерные ленты / Ф.А. Махлис, И.И. Леонов, О.Г. Карабасов, В.В. Никитин. – М.: Химия, 1991. – 169 с.
3. Сопротивление материалов. Под ред. Г.С. Писаренко. – К.: Вища школа. 1973. – 672 с.
4. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
5. Вуба К.Т. О роли заклепок при сдвиге клееклепанных соединений внахлестку // Исследование прочности и деформативности клеевых соединений конструкционных строительных материалов. Под ред. Фрейдина А.С. – М.: Стройиздат. 1975, Вып. 53. – С. 64-71.