

КОНСТРУКТОРСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ШУМОИЗЛУЧЕНИЯ ЗУБЧАТО-РЕМЕННЫХ ПЕРЕДАЧ

А. Г. Баханович

Д. т. н., доцент, ректор Брестского государственного технического
университета, г. Брест, Беларусь, e-mail: rector@bstu.by

Реферат

Рассмотрены конструкторские и технологические методы снижения шумоизлучения в зубчато-ременных передачах. Разработана усовершенствованная методика выбора рациональных геометрических параметров приводных зубчатых ремней, обеспечивающих минимальный уровень шума передачи.

Ключевые слова: зубчато-ременная передача, шумоизлучение, геометрические параметры, технология изготовления.

DESIGN AND TECHNOLOGICAL METHODS FOR REDUCING THE NOISE EMISSION OF TOOTHED-BELT TRANSMISSIONS

A. G. Bakhanovich

Abstract

Design and technological methods of noise emission reduction in toothed-belt transmissions are considered. An improved method for selecting rational geometric parameters of drive toothed belts that ensure a minimum level of transmission noise has been developed.

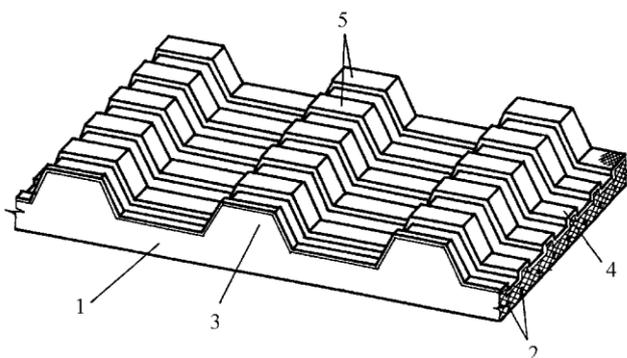
Keywords: toothed-belt transmission, noise emission, geometric parameters, manufacturing technology.

Введение

Анализ мировой научно-технической литературы и проведенный патентно-информационный поиск свидетельствуют о том, что существует тенденция создания конструкций зубчатых ремней, уровень шумоизлучения которых должен понижаться в результате демпфирования колебаний нагрузки.

Технологические методы

Существуют конструкции зубчатых ремней, которые имеют промежуточный слой резины, расположенный между обкладочной тканью и нитями кордшнура. Более эффективный метод демпфирования колебаний реализован в зубчатом ремне, представленном на рисунке 1.



1 – ремень; 2 – корд; 3 – зубья; 4 – обкладка; 5 – гребни

Рисунок 1 – Зубчатый ремень с демпфированием нагрузки

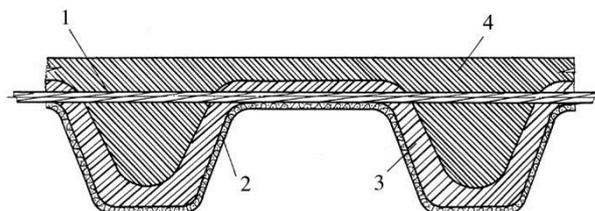
Основное отличие данного ремня – наличие на рабочих поверхностях ряда гребней. При колебаниях нагрузки гребни деформируются и сглаживается пульсация нагрузки. Зубчатый ремень с такими зубьями имеет два значения податливости зубьев. Повышенная податливость реализуется при контакте зубьев ремня и шкива, осуществляемом через гребни. Тогда неравномерность нагружения зубьев на дуге обхвата уменьшается. При перегрузке передачи гребни деформируются, происходит контакт зубьев ремня и шкива по всей поверхности.

Как и в конструкциях клиновых ремней, радикальным методом понижения уровня шумоизлучения зубчатых ремней следует считать

их армирование. Ввиду нетехнологичности армированных резин обычно из них выполняют только зубья ремня или их часть. Армирование всего массива зуба резиной, содержащей неориентированные вискозные волокна, армированные составом Л-19Ф, позволяет повысить усталостную долговечность зубьев ремня $m = 7$ мм при усилии $P = 15$ Н/мм на 50 % [1].

Существует точка зрения, согласно которой армировать волокнистой резиной весь объем зуба нецелесообразно. В работе [2] приводится обоснование конструкции, имеющей зубья с твердой сердцевиной из волокнистой резины и сравнительно мягкие наружные слои. Прочность таких зубьев на 60...80 % выше, чем у серийных ремней, а повышенная податливость поверхностных слоев зуба позволяет получить более благоприятное распределение нагрузки в зацеплении.

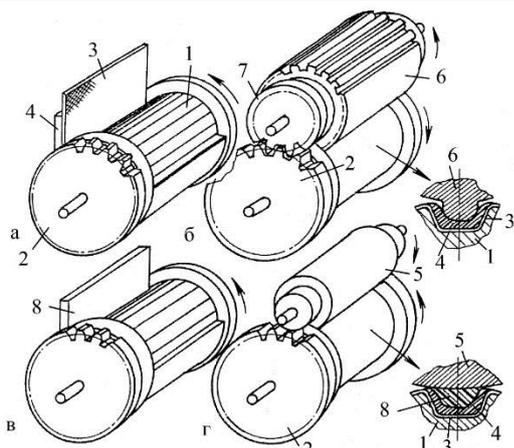
С другой стороны, известно, что усталостная трещина зарождается у основания зуба в поверхностном его слое. Данный поверхностный слой в наибольшей степени подвергается истиранию при зацеплении с зубьями шкива. Таким образом, представляется рациональным размещать волокнистую резину в периферийной части зуба (рис. 2). Недостаток такой конструкции – возможность расслаивания ремня по границе раздела двух слоев резины.



1 – кордшнур; 2 – обкладочная ткань;
3 – мягкий поверхностный слой; 4 – твердая основа

Рисунок 2 – Зубчатый ремень с наружным демпфирующим слоем

Технология сборки армированных ремней дополняется операциями укладки армирующих слоев или самой арматуры. Так, разработан метод сборки зубчатых ремней с зубьями, содержащими слою армированной резины (рис. 3).



а) укладка обкладочной ткани и армированной резины;
б) прикатка профильным валком; в) укладка неармированной резины;
г) прикатка гладким роликом

Рисунок 3 – Последовательность сборки армированного зубчатого ремня

Метод позволяет получить требуемую конфигурацию армирующего слоя резины во всех зубьях ремня [3]. Последовательность операций, согласно этому методу, следующая. На зубчатый сборочный барабан (1), снабженный дополнительным зубчатым венцом (2), укладывают обкладочную ткань (5). Затем профильный вал (6), оснащенный зубчатым венцом (7), входит в зацепление с зубчатым венцом (2) сборочного барабана (1). Далее на сборочный барабан (1) наматывается кордшнур, укладывается слой неармированной резины (8) и производится его прикатка гладким цилиндрическим роликом (9). Заготовка вместе с зубчатым сборочным барабаном снимается со станка и вулканизируется под действием тепла и давления.

Рациональные геометрические параметры приводных ремней.

Каркас как зубчатых, так и ремней фрикционного типа (плоских, поликлиновых, кордшнуровых клиновых) можно представить в виде плоского однонаправленного армированного слоя (рис. 4), образованного совокупностью армирующих элементов (кордшнуров) диаметром $d_c^{(k)}$, расположенных параллельно в массиве толщиной $h_0^{(k)} = H_p - h_p$. Семейство этих армирующих элементов однородно и обладает значительной по сравнению с окружающим эластомером прочностью и жесткостью.

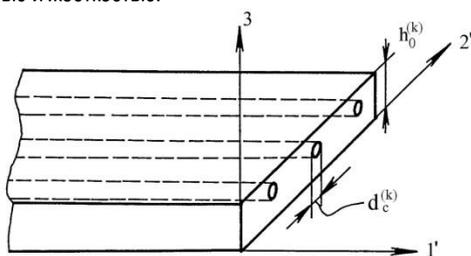


Рисунок 4 – Однонаправленно армированный несущий слой ремня

Методы, дающие оценку жесткости армирующего слоя, в совокупности можно условно классифицировать следующим образом:

- 1) анализ композиционного материала на основе курса сопротивления материалов;
- 2) оценка верхних и нижних границ жесткости композиционного материала на основе вариационных принципов;
- 3) анализ композиционного материала на основе теории упругости;
- 4) решение методом конечных элементов.

Ниже остановимся на подходе, в основу которого положены зависимости для определения упругих постоянных армированного слоя, полученные с применением первых трех методов.

Рассмотрим однонаправленно армированный слой (рис. 4), направив оси 1', 2', 3 вдоль армирующих волокон, перпендикулярно им в плоскости слоя и ортогонально плоскости слоя. Будем считать

матрицу линейно-упругой и изотропной с модулем упругости $E_R^{(k)}$, модулем сдвига $G_R^{(k)}$ и коэффициентом Пуассона $\nu_R^{(k)}$.

Аналогичное предположение сделаем относительно армирующих волокон, обозначив их упругие постоянные через $E_c^{(k)}$, $G_c^{(k)}$ и $\nu_c^{(k)}$.

Коэффициент армирования $\psi_c^{(k)}$ характеризует относительное объемное содержание волокон (корда). В этом случае соотношения между напряжениями и деформациями для слоя в его осях симметрии запишем так:

$$\psi_c^{(k)} = \frac{\pi(d_c^{(k)})^2}{4h_0^{(k)}l_c^{(k)}},$$

где $l_c^{(k)}$ – частота армирования (шаг навивки корда).

Если принять допущение, что насыщение кордом достаточно частое ($\alpha_c^{(k)} \approx l_c^{(k)}$), то с достаточной точностью можно считать слой изотропным, причем плоскость 2' 3 является плоскостью изотропии.

В этом случае соотношения между напряжениями и деформациями для слоя в его осях симметрии запишем так:

$$\begin{aligned} \sigma_{1'1'} &= C_{11}^{(k)}\varepsilon_{1'1'} + C_{12}^{(k)}\varepsilon_{2'2'}; & \sigma_{1'2'} &= C_{12}^{(k)}\varepsilon_{1'2'}; \\ \sigma_{2'2'} &= C_{12}^{(k)}\varepsilon_{1'1'} + C_{22}^{(k)}\varepsilon_{2'2'}; \\ \varepsilon_{1'3} &= (G_{13}^{(k)})^{-1}\sigma_{1'3}; & \varepsilon_{2'3} &= (G_{23}^{(k)})^{-1}\sigma_{2'3}. \end{aligned}$$

Компоненты матрицы осредненной жесткости армированного слоя находим с помощью выражений:

$$\begin{aligned} C_{11}^{(k)} &= \frac{E_1^{(k)}}{1-\nu_{12}^{(k)}\nu_{21}^{(k)}}; & C_{22}^{(k)} &= \frac{E_2^{(k)}}{1-\nu_{12}^{(k)}\nu_{21}^{(k)}}; \\ C_{12}^{(k)} &= \frac{\nu_{21}^{(k)}E_1^{(k)}}{1-\nu_{12}^{(k)}\nu_{21}^{(k)}}; & C_{21}^{(k)} &= C_{12}^{(k)}. \end{aligned}$$

где $E_1^{(k)}$, $E_2^{(k)}$ – модули упругости однонаправленного армированного слоя вдоль и поперек волокон корда;

$\nu_{12}^{(k)}$, $\nu_{21}^{(k)}$ – коэффициенты Пуассона;

$G_{12}^{(k)}$ – модуль сдвига в плоскости слоя;

$G_{13}^{(k)}$, $G_{23}^{(k)}$ – модули поперечного сдвига.

При этом справедливы равенства:

$$G_{13}^{(k)} = G_{12}^{(k)}, \quad \nu_{21}^{(k)} = \nu_{12}^{(k)} \frac{E_2^{(k)}}{E_1^{(k)}}.$$

Модуль упругости $E_1^{(k)}$, и коэффициент Пуассона $\nu_{12}^{(k)}$ с достаточной для практических результатов точностью определим из следующих соотношений:

$$\begin{aligned} E_1^{(k)} &= E_c^{(k)}\psi_c^{(k)} + E_R^{(k)}(1 - \psi_c^{(k)}); \\ \nu_{12}^{(k)} &= \nu_c^{(k)}\psi_c^{(k)} + \nu_R^{(k)}(1 - \psi_c^{(k)}), \end{aligned}$$

Для модуля упругости поперек волокон корда воспользуемся зависимостью, полученной на основе различных допущений о законах распределения напряжений и деформаций в армированном слое:

$$E_2^{(k)} = \frac{e_k E_1^{(k)}}{[\psi_c^{(k)} + e_k(1 - \psi_c^{(k)})][1 + (\varepsilon_k)\psi_c^{(k)}]}$$

где $e_k = \frac{E_c^{(k)}}{E_R^{(k)}}$.

Рассмотрим модуль сдвига в плоскости армированного слоя. Для этого модуля с помощью вариационного метода после ряда преобразований получим:

$$G_{12}^{(k)} = \frac{g_k(1 + \psi_c^{(k)}) + 1 - \psi_c^{(k)}}{g_k(1 - \psi_c^{(k)}) + 1 + \psi_c^{(k)}} G_R^{(k)},$$

где $g_k = \frac{G_c^{(k)}}{G_R^{(k)}}; G_c^{(k)} = \frac{E_c^{(k)}}{2(1 + \nu_c^{(k)})}; G_R^{(k)} = \frac{E_R^{(k)}}{2(1 + \nu_R^{(k)})}$.

Анализ армированного слоя методами сопротивления материалов позволяет получить значение модуля поперечного сдвига:

$$G_{23}^{(k)} = \frac{g_k}{g_k(1 - \psi_c^{(k)}) + \psi_c^{(k)}} G_2^{(k)}.$$

Обозначим: $D = \frac{\sqrt{E_1^{(k)} E_2^{(k)} h_0^{(k)}}}{2(1 - \sqrt{\nu_c^{(k)} \nu_R^{(k)}})} \psi_c^{(k)}$ – приведенная жесткость

армированного слоя.

Тогда уравнение малых свободных колебаний такого слоя можно получить, заменяя в уравнении равновесия поперечную нагрузку инерционным членом:

$$q = \rho_k h_0^{(k)} \frac{\delta^2 W}{\delta t^2},$$

где ρ_k – удельная плотность материала;
 W – прогиб (амплитуда колебаний) слоя;
 t – время.

Опуская преобразования, получим уравнение малых свободных колебаний продольно-армированного слоя:

$$D = \left(1 - \frac{\theta(h_0^{(k)})^2}{\beta} \Delta\right) \Delta \Delta \chi + F_{11} - 2F_{12} + F_{22} + \rho_0 h_0^{(k)} \frac{\delta^2 W}{\delta t^2} = 0, \quad (1)$$

где Δ – оператор Лапласа; $\rho_0 = \rho_k$.

Так как рассматриваемый слой имеет прямоугольную форму, то из (1) следует:

$$D(1 - h_0^{(k)} \Delta) \Delta \Delta \chi + \rho_0 h_0^{(k)} \frac{\delta^2}{\delta t^2} (1 - (h_0^{(k)})^2 \Delta) \chi = 0. \quad (2)$$

Граничные условия представим в форме:

$$X = \frac{\delta^2 \chi}{\delta \alpha_1^2} = \frac{\delta^4 \chi}{\delta \alpha_1^4} = 0; \quad \text{при } \alpha_1 = 0.$$

$$X = \frac{\delta^2 \chi}{\delta \alpha_2} = \frac{\delta^4 \chi}{\delta \alpha_1^4} = 0; \quad \text{при } \alpha_2 = 0; \quad \alpha_1 = B_p.$$

Решение (2) представим в виде:

$$X = X_0 e^{i\omega_0 t} \sin \frac{m\pi\alpha_1}{e} \sin \frac{n\pi\alpha_2}{B_p}, \quad (3)$$

где m, n – число полуволн в направлениях α_1, α_2 ;

ω_0 – частота собственных колебаний;

X_0 – некоторая постоянная.

Подставляя (3) в (2), после преобразований получим значение частоты:

$$\omega_0^2 = \frac{D}{\rho_0 h_0^{(k)}} \omega_2^2, \quad (4)$$

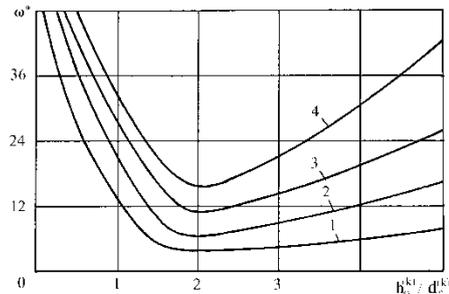
где $\omega_2^2 = \pi^4 (m^2 + \lambda^2 n^2) \frac{1 + \theta k (m^2 + \lambda^2 n^2)}{1 + k (m^2 + \lambda^2 n^2)}; k = \frac{\pi^2 (h_0^{(k)})^2}{\beta^2};$

$$\lambda = \frac{l}{B_p}.$$

Выводы

Рассматривая свободные колебания при фиксированных значениях длины ветви ремня и его ширины $B_p = 10$ мм при показателях жесткости, характерных для зубчатых ремней, путем решения (4) численными методами в соответствии с методикой ортогонального планирования, установлено следующее:

- а) минимальная амплитуда колебаний ветвей ремня и, следовательно, минимальное шумоизлучение передачи, связанное с колебаниями ветвей, наблюдается при конструктивном выполнении $h_0^{(k)} \approx 2d_c^{(k)}$ (рис. 5), при этом утолщение ремня не приводит к существенному увеличению амплитуды ремня;
- б) величина шага навивки корда практически не влияет на частоту свободных колебаний;
- в) целесообразной конструкцией с точки зрения минимизации амплитуды колебаний следует считать исполнение с длиной ветви $L_B = (80 \dots 100)h_0^{(k)}$, т. е. для снижения шумоизлучения необходимо при прочих равных условиях подбирать такой типоразмер ремня (со стандартной толщиной), который бы обеспечивал получение длин ветвей, равных примерно стократной их толщине.



1, 2, 3, 4 – номера форм колебаний

Рисунок 5 – Зависимость частоты колебаний от конструктивного параметра

Таким образом, посредством рационализации геометрических параметров ремня и передачи возможно обеспечение минимального уровня ее шумоизлучения.

Список цитированных источников

1. Никончук, А. Н. Усталостная прочность зубьев зубчатых ремней / А. Н. Никончук, В. И. Шпилевский. – Минск : БПИ, 1989. – Деп. в ВНИИТЭМР 19.10.89. № 296 - МШ89/РЖ48.
2. Козачевский, Г. Г. Зубчатые ремни повышенной несущей способности / Г. Г. Козачевский, Л. Ф. Павловская, А. Н. Никончук // Промышленность синтетического каучука, резиновых технических изделий. – 1988. – № 2. – С. 26–28.
3. А.С. СССР 1426835, МКИ³ В29 С29/С8. Способ изготовления зубчатых ремней и устройство для его осуществления / А. Н. Никончук, Г. Г. Козачевский, В. В. Никитин, БПИ. – Опубл. 30.09.88, Бул. №36 // Открытия. Изобретения. – № 36. – 1988. – С. 74.

References

1. Nikonchuk, A. N. Ustalostnaya prochnost' zub'ev zubchatykh remnev / A. N. Nikonchuk, V. I. Shpilevskiy. – Minsk : BPI, 1989. – Dep. v VNIITEMR 19.10.89. № 296 - MSH89/RZH48.
2. Kozachevskiy, G. G. Zubchatye remni povshennoy nesushchey sposobnosti / G. G. Kozachevskiy, L. F. Pavlovskaya, A. N. Nikonchuk // Promyshlennost' sintetichesko-kauchuka, rezinovykh tekhnicheskikh izdeliy. – 1988. – № 2. – S. 26–28.
3. A.S. SSSR 1426835. MKI3 B29 C29/C8. Spособ izgotovleniya zubchatykh remnev i ustrovstvo dlya yego osushchestvleniya / A. N. Nikonchuk, G. G. Kozachevskiy, V. V. Nikitin, BPI. – Opubl. 30.09.88, Byul. №36 // Otkrytiya. Izobreteniya. – № 36. – 1988. – S. 74.

Материал поступил в редакцию 19.12.2021

Машиностроение

doi.org/10.36773/1818-1112-2022-127-1-70-72