

**КОНСТРУКТОРСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ
НАДЕЖНОСТИ ЗУБЧАТО-РЕМЕННЫХ ПЕРЕДАЧ**

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Технические характеристики зубчато-ременных передач зависят от показателей работоспособности приводных зубчатых ремней. Одним из основных мероприятий повышения несущей способности и эксплуатационного ресурса приводных зубчатых ремней является их армирование. Различают микро- и макроармирование.

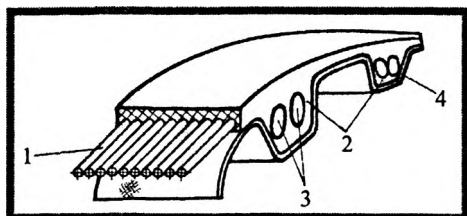


Рисунок 1 – Зубчатый ремень с армирующими вкладышами:
1 – несущий слой; 2 – зуб ремня;
3 – вкладыши; 4 – обкладка

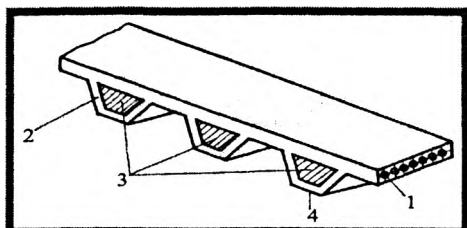


Рисунок 2 – Зубчатый ремень с профильными вкладышами:
1 – несущий слой; 2 – зуб ремня;
3 – вкладыши; 4 – обкладка

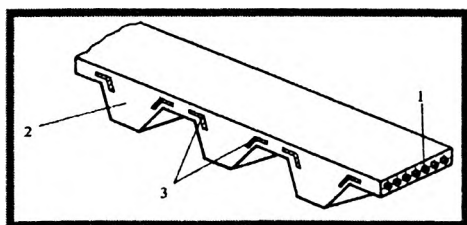


Рисунок 3 – Зубчатый ремень с вкладышами в местах наибольшей локализации напряжений:
1 – несущий слой; 2 – зуб

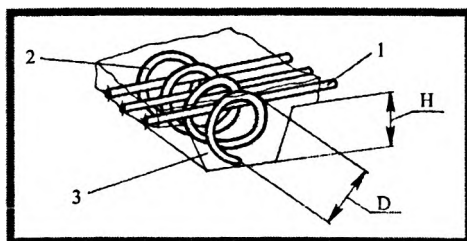


Рисунок 4 – Зубчатый ремень со спиральными цилиндрическими пружинами:
1 – несущий слой;
2 – пружина; 3 – зуб ремня

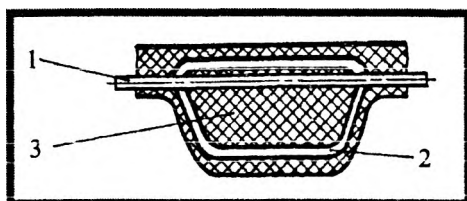


Рисунок 5 – Зубчатый ремень с поперечными профильными пружинами:
1 – несущий слой; 2 – пружина; 3 – зуб ремня

Микроармирование представляет собой замену части резинового или полиуретанового зуба

ремня полимерным композитом, содержащим отрезки стеклянных, вязкозных или металлических волокон, обработанных адгезионными составами.

Одним из способов макроармирования является оснащение рабочей поверхности зубьев ремня двойным слоем износостойкой обкладочной ткани [1], что позволяет увеличить передаваемое окружное усилие в 1,35 раза при долговечности 10^7 циклов или в 1,25 раза – при долговечности 10^8 циклов.

Разработаны конструкции зубчатых ремней с армирующими втулками, которые могут располагаться вдоль зубьев ремня [2] (рисунок 1), иметь форму, соответствующую профилю зубьев ремня [3] (рисунок 2), или размещаться в зонах концентрации напряжений [4] (рисунок 3).

Данные конструкции зубчатых ремней отличаются повышенными массой и изгибной жесткостью. Кроме того, при передаче мощности значительно возрастают сдвигающие напряжения в эластомере, расположенном между несущим слоем и арматурой. Частичное устранение этих недостатков достигнуто в конструкциях ремней с арматурой в виде спиральных пружин (рисунок 4) или проволоки, изогнутой по профилю зуба (рисунок 5) [5, 6].

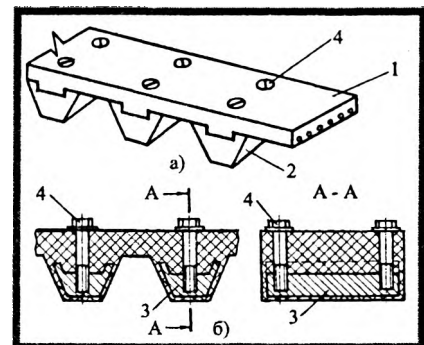


Рисунок 6 – Зубчатые ремни с механическим креплением несущих элементов:

а) с механическим креплением зубьев;

б) с механическим креплением арматуры;

1 – каркас ремня; 2 – зубья;

3 – армирующие элементы;

4 – крепежные детали

Разработаны конструкции зубчатых ремней с механическим креплением армирующих элементов к несущему слою [7] (рисунок 6,а) и с привинчиваемыми зубьями, выполненными из износостойкого материала [8] (рисунок 6,б). Несмотря на высокую долговечность, ремонтпригодность и др., данные ремни характеризуются невысокой технологичностью и значительной трудоёмкостью обслуживания.

Разработаны конструкции зубчатых ремней с несущим слоем в виде металлической ленты [9, 10] (рисунок 7). Данные ремни обладают высокой продольной жесткостью, а зубья имеют наивысшую по сравнению с рассмотренными выше конструкциями усталостную прочность [11]. Основным недостатком таких ремней является их повышенная изгибная жесткость, для снижения которой необходима сплошная перфорация ленты или повышенное натяжение ремня, что приводит к снижению его долговечности. Возможно также повышение виброактивности привода и снижение его КПД.

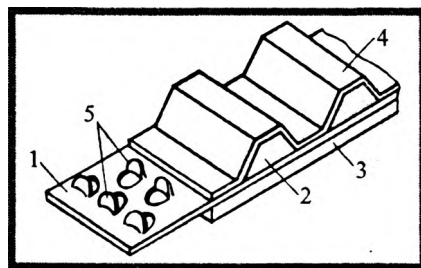


Рисунок 7 – Зубчатый ремень с несущим слоем в виде металлической ленты:

1 – лента; 2 – зуб;

3 – наполнитель;

4 – обкладочная ткань;

5 – лепестки

В НИИЛ ременных передач и систем приводов (БНТУ) разработаны конструкции приводных зубчатых ремней с втулочно-петлевым армированием зубьев (ВПА) и технология их изготовления [12]. Базовая конструкция представлена на рисунке 8.

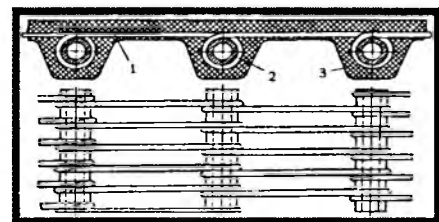


Рисунок 8 – Зубчатый ремень с втулочно-петлевым армированием зубьев:

1 – несущий слой; 2 – втулка;

3 – зуб ремня

Все петли несущего слоя 1 охватывают втулки 2, размещенные вдоль зубьев ремня 3, и имеют одно направление навивки [13], чем обеспечивается высокая технологичность сборки заготовок ремня. В данной конструкции зубчатого ремня окружное усилие передается от зубьев несущему слою без возникновения в массиве эластомера сдвигающих напряжений. При этом прочность зубьев определяется не механическими свойствами эластомера или прочностью его адгезии к несущему слою, а физико-механическими показателями последнего. Изготовлены опытно-промышленные зубчатые ремни с ВПА с шагом зубьев 50,8 мм (рисунок 9).

Ремни с ВПА с шагом зубьев 50,8 мм (рисунок 9).

На рисунках 10, 11 представлены результаты конечно-элементного компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния неармированных зубьев приводного зубчатого ремня полукруглого профиля, проведенного в среде ANSYS [14].

Ремень растягивают слева направо силой 8,0 кН. Несущий слой ремня считается нерастяжимым. Для определенности положения ремня вдоль несущего слоя запрещены вертикальные перемещения. Шкив считается неподвижным и абсолютно жестким. Коэффициент трения в контакте $f_{тр} = 0,5$. Материал ремня смоделирован по принципу Муни-Ривлина [15]. Модуль упругости полимера $E = 5$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,5$.

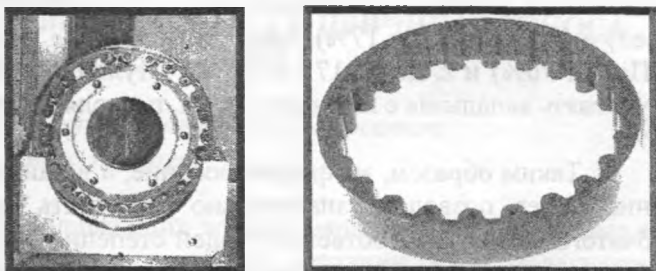


Рисунок 9 – Технологическая пресс-форма и внешний вид зубчатого ремня с ВПА

Результаты моделирования показывают, что максимальные значения растягивающего напряжения σ_1 и интенсивности деформации (деформации по Мизесу) ϵ_s , приводящие к образованию и развитию усталостной трещины, наблюдаются на радиусе перехода боковой поверхности зуба к поверхности межзубной впадины. При этом $\sigma_1 = 12,9$ МПа, $\epsilon_s = 2,042$ (по истинной шкале).

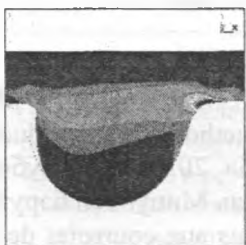


Рисунок 10 – Распределение напряжений

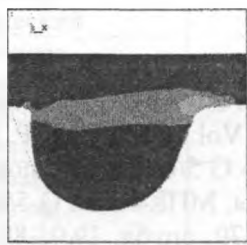


Рисунок 11 – Деформации по Мизесу

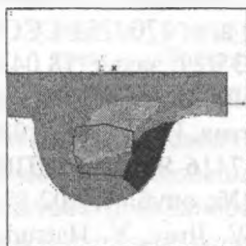


Рисунок 12 – Распределение напряжений

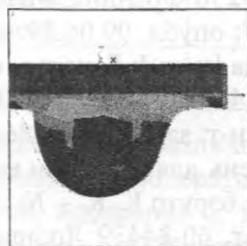


Рисунок 13 – Деформации по Мизесу

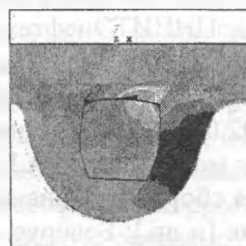


Рисунок 14 – Распределение напряжений

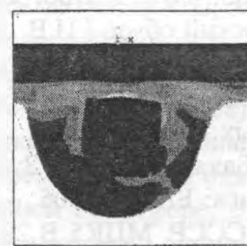


Рисунок 15 – Деформации по Мизесу

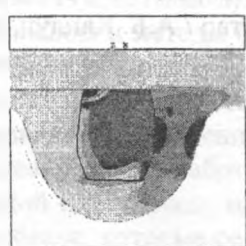


Рисунок 16 – Распределение напряжений

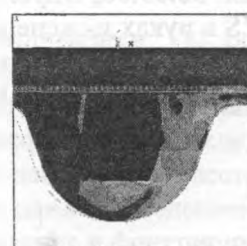


Рисунок 17 – Деформации по Мизесу

На рисунках 12-17 представлены результаты конечно-элементного компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния макроармированных зубьев приводного зубчатого ремня полукруглого профиля трех конструктивных исполнений: 1) макроармирование зуба одним пустотелым вкладышем Ø10 мм, не имеющего механической связи с несущим слоем (рисунки 12, 13); 2) макроармирование зуба одним пустотелым вкладышем Ø12 мм, также не имею-

шего механической связи с несущим слоем (рисунки 14, 15); 3) втулочно-петлевое армирование зуба одним пустотелым вкладышем $\varnothing 12$ мм (рисунки 16, 17).

Результаты исследований показывают, что макроармирование вкладышем $\varnothing 10$ мм позволяет снизить в опасном сечении σ_1 до 7,1 МПа (на 45% по сравнению с неармированной конструкцией) и ϵ_r до 1,694 (на 17%). Макроармирование вкладышем $\varnothing 12$ мм позволяет снизить σ_1 до 3,8 МПа (на 70%) и ϵ_r до 1,217 (на 40%). Втулочно-петлевое армирование, реализующее механическую связь вкладыша с несущим слоем, позволяет снизить σ_1 до 1,7 МПа (на 87%) и ϵ_r до 0,502 (на 75%).

Таким образом, макроармирование, а в наибольшей степени – втулочно-петлевое армирование зубьев, позволяют значительно уменьшить напряжения и деформации в опасном сечении зубчатого ремня, и в соответствующей степени повысить несущую способность и долговечность зубчато-ременной передачи. Высокий уровень несущей способности и долговечности армированных зубчатых ремней в сочетании с другими достоинствами зубчато-ременных передач (низкий уровень вибраций и шумоизлучения, низкая материалоемкость и масса ремня, отсутствие обслуживания и ремонта, высокая антикоррозионная стойкость и др.) позволяет им заменять цепные передачи в энергоемких приводах технологического оборудования. Компьютерное моделирование, результаты которого соответствуют теоретическим предпосылкам и промышленным испытаниям, позволило обеспечить качественно новый уровень проектирования зубчато-ременных передач с повышенными техническими характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cicognani, M. Zur Anvengung von Zahnriemen fur den Antrieb / M. Cicognani // *Motortech-nische Zeitschrift*. – 1978. – Vol. 39, № 12. – P. 551-556.
2. Cog-belt and method for its production: пат. 3772929 США, МПК3 F 16 G 5/00 / J. Redmond. – заявл. 14.10.71; опублик. 20.11.73.
3. Зубчатый ремень: пат. 63-24179 Япония, МПК4 F 16 G 5/06, B 29 D 29/10 / заявитель Мицубиси бэруто К. К. – № 54-154676; заявл. 28.11.79; опублик. 19.05.88. – 5 с.
4. Perfectionnements aux courroies de transmis-sion de puissance: пат. 2624238 Франция, МПК3 F 16 G 5/10 / J. Simon; заявитель Hutchinson Co. - № 8717039; заявл. 08.12.87; опублик. 09.06.89. – 3 с.
5. Зубчатый ремень: а. с. 1709783 СССР, МПК5 F 16 G 5/00 / А.Т. Скойбеда [и др.]; Белорус. политех. ин-т. – № 4059035/27; заявл. 18.04.86; ДСП.
6. Зубчатый ремень: а. с. 1449745 СССР, МПК4 F 16 G 5/00 / А.Т. Скойбеда, А.Н. Зуб, А.Н. Ната-левич; Белорус. политех. ин-т; заявл. 06.11.86; опублик. 07.01.89 // *Открытия. Изобрет.* – 1989. – № 1. – С. 42.
7. Приводной ремень для передачи высоких нагрузок: пат. 62-7416 Япония, МПК4 F 16 G 5/06 / заявитель Мицубиси бэруто К. К. – № 57-186631; заявл. 23.10.82; опублик. 17.02.87. – 4 с.
8. Power transmission belt: пат. 60-84439 Япония, МПК4 F 16 G 1/28 / W. Jirov, Y. Hatsudoki; – за-явл. 15.10.83, опублик. 14.09.85. – 8 с.
9. Прогрессивные конструкции зубчатых ремней и технология их производства: тематический обзор / Н.В. Лапшина [и др.]. – Москва: ЦНИИТЭнефтехим, 1987. – 55 с.
10. Courroï dentee: междунар. заявка РСТ 87/01779, МПК4 F 16 G 1/28 / V.V. Guskov [et al.]; Belorus. polytech. in-t. – заявл. 19.09.85; опублик. 26.03.87.
11. Козачевский, Г.Г. Повышение долго-вечности зубчато-ременных передач: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.02 / Г.Г. Козачевский. – Минск, 1985. – 181 л.
12. Баханович, А.Г. Зубчато-ременные передачи: монография / А.Г. Баханович, А.Т. Скойбеда. – Минск: БНТУ, 2005. – 364 с.
13. Устройство для сборки бесконечных рези-новых лент: а. с. 1669756 СССР, МПК5 B 29 D 29/08 / А.И. Бобровник [и др.]; Белорус. политех. ин-т. – № 4400460/05; заявл. 30.03.88; Опублик. 15.08.91 // *Открытия. Изобрет.* – 1993. – № 30. – С. 54.
14. Каплун, А.Б. ANSYS в руках инженера: практическое руководство / А.Б. Каплун, Е.М. Мо-розов, М.А. Олферьева. – Москва: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
15. Eringen, A. Nonlinear theory of continuous media / A. Eringen. – New York: McGraw Hill Book Co., 1962. – 448 p.