

УДК 621.85.052.44

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИВОДНЫХ ЗУБЧАТЫХ РЕМНЕЙ АРМИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ*канд. техн. наук, доц. А.Г. БАХАНОВИЧ**(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Представлены результаты компьютерного конечно-элементного моделирования напряженно-деформированного состояния армированных приводных зубчатых ремней, что позволяет на стадии проектирования определить их рациональную конструкцию, отличающуюся повышенной несущей способностью и долговечностью.

Введение. Систематические отказы, возникающие в процессе эксплуатации зубчато-ременных передач, распределены по её элементам крайне неравномерно. Выход из строя шкивов передачи сравнительно редок и более характерен для конструкций, изготовленных из неметаллических материалов [1]. Менее вероятен износ шкивов из армированных пластиков, например текстолита, или изготовленных из лёгких сплавов на алюминиевой основе, не подвергающихся упрочняющей обработке или анодированию. Ресурс шкивов, изготовленных из стали, чугуна, керамических композитов, практически неограничен.

Таким образом, повышение технических характеристик зубчато-ременных передач сводится к решению проблемы повышения показателей работоспособности приводных зубчатых ремней.

Основным мероприятием, позволяющим повысить несущую способность и долговечность зубьев ремня, является их армирование. Различают микро- и макроармирование.

Микроармирование сводится к замене части объема зуба, изготовленного из резины или полиуретана, каким-либо композитом на каучуковой или иной полимерной основе. Такой композит обычно содержит отрезки рубленых стеклянных, вязкозных или металлических волокон, для повышения адгезии с основой обработанных специальными составами.

Наиболее эффективным способом повышения несущей способности и долговечности зубьев ремня является их макроармирование.

Обзор исследований и постановка задачи. Наиболее простой его реализацией является оснащение зубьев ремня дополнительным слоем обкладочной ткани [2]. Ремни с двойной обкладочной тканью позволяют передавать в 1,35 раза большее окружное усилие по сравнению с обычным ремнём с однослойным покрытием при долговечности порядка 10^7 циклов и в 1,25 раза при долговечности 10^8 циклов.

Известны конструкции зубчатых ремней с армирующими вкладышами в зубьях. Такие вкладыши располагают вдоль зуба ремня вблизи кордшнуров. Количество вкладышей в каждом зубе может варьироваться от 1 до 3, однако наиболее рациональное заполнение ими материала зуба наблюдается при их попарном расположении [3].

Для снижения концентрации напряжений у основания зубьев вкладышам может придаваться форма, соответствующая профилю зубьев ремня [4].

С этой же целью арматура может размещаться в местах наибольшей локализации напряжений [5].

Следует отметить, что подобные конструктивные решения в значительной мере утяжеляют ремень, увеличивается также его изгибная жесткость. Основным же недостатком является то, что при передаче окружного усилия наблюдается появление значительных сдвигающих напряжений в сравнительно тонком слое эластомера, расположенного между кордшнуром и арматурой. Более развитой поверхностью контакта с несущим кордшнуром и меньшей массой обладает арматура в виде спиральных пружин, расположенных вдоль зуба ремня между витками его кордшнура, а также специально изогнутая проволока различной конфигурации [6, 7].

Полное устранение вышеназванного недостатка достигается в конструкциях ремней с механическим креплением арматуры к несущему кордшнуру или с непосредственной связью последних. Зубчатые ремни такого типа представляют собой ленту с отверстиями над зубьями, а арматура снабжена резьбовыми отверстиями [8]. Известны также ремни с привинчиваемыми зубьями, выполненными из износостойкого материала [9].

Несмотря на свои преимущества, к которым можно отнести высокую долговечность, ремонтпригодность и др., подобные ремни не получили широкого распространения из-за своей нетехнологичности и трудоёмкости обслуживания в процессе эксплуатации. Определённым недостатком можно считать также то, что отверстия под болты в ленте являются концентраторами напряжений, наличие которых не позволяет задавать высокие значения натяжения ветвей.

Авторы [10, 11] предлагают зубчатые ремни с несущим слоем в виде тонких (0,08...0,12 мм) металлических лент. Реализация непосредственной механической связи арматуры с несущим слоем достигается путем пробивки и отгибания в теле зуба ремня лепестков разнообразной формы.

Такие ремни обладают высокой продольной жесткостью, а их зубья имеют наивысшую по сравнению с рассмотренными выше конструкциями усталостную прочность [12]. К недостаткам ремней с кордом в виде металлической ленты следует отнести их повышенную изгибную жесткость. Для компенсации её влияния требуется либо сплошная перфорация ленты, либо повышенное натяжение ремня. И то и другое ведёт к снижению долговечности самого ремня и, возможно, других деталей передачи (валов, подшипников). Не исключается также ухудшение других эксплуатационных показателей, например, виброактивности привода и его КПД. Иной подход предлагают авторы ремня с поперечными армирующими стержнями, обмотанными через определенные интервалы петлями несущего кордшнура [13].

В этом ремне высокая продольная жесткость сочетается с незначительной изгибной жесткостью кордшнуров. По показателю изгибной жесткости такой ремень не отличается от серийных неармированных аналогов. В то же время достигается непосредственная связь между кордшнуром и арматурой зуба. Практически окружное усилие с арматуры передается сразу на витки кордшнура, минуя промежуточные элементы. Однако подобный ремень не получил широкого распространения из-за своей нетехнологичности, вытекающей из разного направления навивки петель кордшнура, охватывающих арматуру.

В Белорусском национальном техническом университете разработаны прогрессивные конструкции ремней с втулочно-петлевым армированием (ВПА), а также высокопроизводительная технология их изготовления [14-17]. Базовая конструкция представлена на рис. 1.

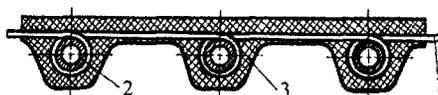


Рис. 1. Продольный разрез ремня с втулочно-петлевым армированием (ВПА) зубьев; 1 - несущий слой; 2 - втулка; 3 - зуб ремня

Все петли продольно навитого несущего слоя 1, охватывающие втулки 2, размещенные вдоль зубьев ремня 3, имеют одно направление навивки [18]. Данная конструктивная особенность обеспечивает достаточно высокую технологичность процесса сборки заготовок зубчатых ремней и позволяет осуществлять армирование зубчатых ремней с $t_p > 10$ мм. Изготовлены опытно-промышленные партии зубчатых ремней с ВПА, имеющие шаг зубьев 50,8 мм.

Как видно из рис. 1, окружное усилие с зубьев ремня передается несущему слою без возникновения в массиве зубчатых ремней сдвигающих напряжений. При этом прочность зубьев зубчатых ремней определяется не механическими свойствами эластомера или прочностью его адгезии к несущему слою, а физико-механическими показателями последнего.

Результаты эксперимента и их обсуждение. На рис. 2, 3 представлены результаты конечно-элементного компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния неармированных зубьев приводного зубчатого ремня полукруглого профиля, проведенного в среде ANSYS [19]. Ремень растягивают слева направо силой 8,0 Н/мм. 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 $f = 0,5$. Материал ремня смоделирован по принципу Муни – Ривлина [20]. Модуль упругости полимера $E = 5$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,5$.

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

На рис.4-9 представлены аналогичные результаты конечно-элементного компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния макроармированных зубьев приводного зубчатого ремня полукруглого профиля трех конструктивных исполнений: 1 – макроармирование зуба одним пустотелым вкладышем $\varnothing 10$ мм, не имеющего механической связи с несущим слоем (рис. 4, 5); 2 – аналогичное макроармирование зуба одним пустотелым вкладышем $\varnothing 12$ мм (рис. 6, 7); 3 – втулочно-петлевое армирование зуба одним пустотелым вкладышем $\varnothing 12$ мм (рис. 8, 9).

Результаты исследований показывают, что макроармирование зуба ремня вкладышем $\varnothing 10$ мм позволяет снизить в опасном сечении σ_1 до 7,1 МПа (на 45 % по сравнению с неармированной конструкцией) и ϵ_e до 1,694 (17 %). Макроармирование вкладышем $\varnothing 12$ мм позволяет снизить σ_1 до 3,8 МПа (70 %) и

8, до 1,217 (40 %). Втулочно-петлевое армирование, реализующее механическую связь вкладыша с несущим слоем, позволяет снизить σ , до 1,7 МПа (87%) и E до 0,502 (75 %).

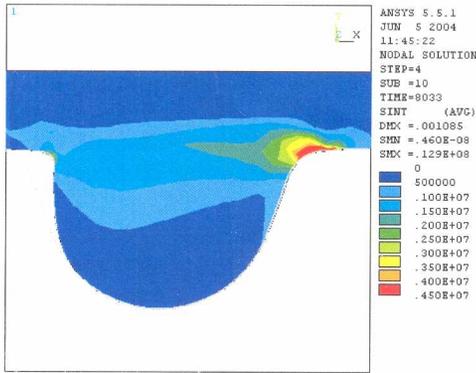


Рис. 2. Распределение напряжений

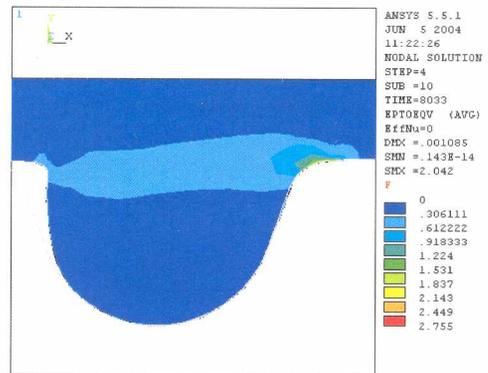


Рис. 3. Деформации по Мизесу

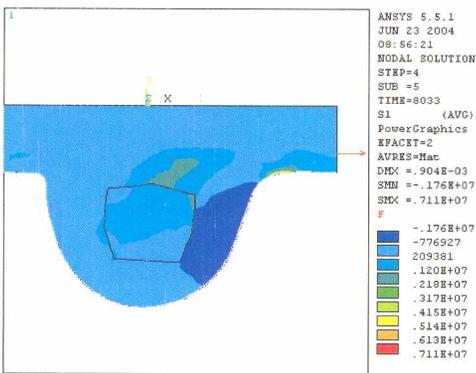


Рис. 4. Распределение напряжений

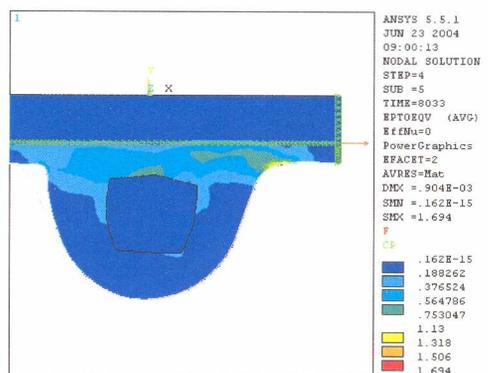


Рис. 5. Деформации по Мизесу

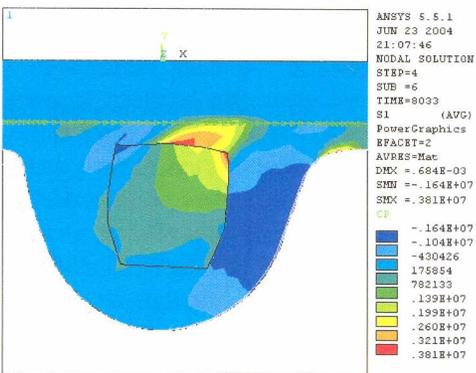


Рис. 6. Распределение напряжений

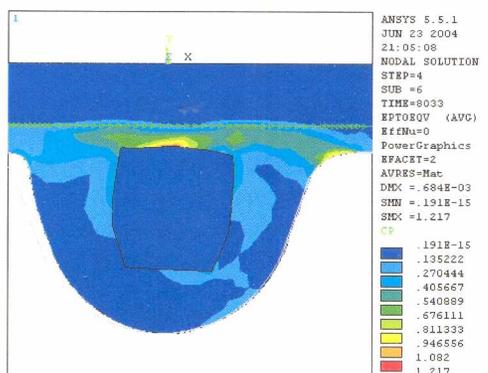


Рис. 7. Деформации по Мизесу

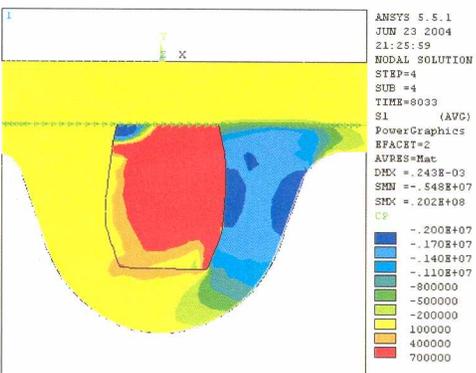


Рис. 8. Распределение напряжений

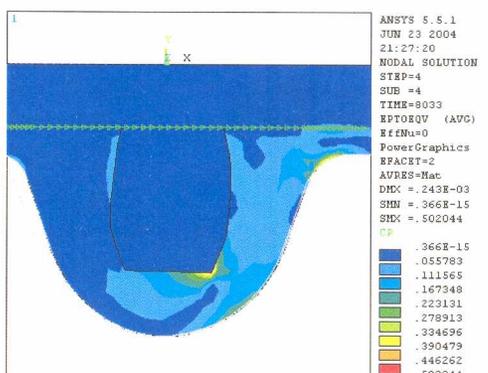


Рис. 9. Деформации по Мизесу

Выводы

Макроармирование зубьев ремня позволяет значительно уменьшить напряжения и деформации в опасном сечении и в соответствующей степени повысить несущую способность и долговечность зубчато-ременной передачи.

Принципиально новым подходом в решении задачи повышения технических характеристик зубчато-ременных передач является втулочно-петлевое армирование зубьев ремня, позволяющее осуществить механическую связь армирующего элемента и несущего слоя. В данном случае нагрузка с зубьев на несущий слой передается непосредственно, а не за счет адгезионных связей, возникающих в тонком слое эластомера между втулкой и кордом. Образно говоря, при втулочно-петлевом армировании принцип «тягача» заменяется принципом «бульдозера».

Высокий уровень несущей способности и долговечности зубчато-ременных передач с втулочно-петлевым армированием в сочетании с другими достоинствами этих передач (низкий уровень вибраций и шумоизлучения, низкая материалоемкость и масса ремня, отсутствие обслуживания и ремонта, высокая антикоррозионная стойкость и др.), позволяет им начать замену цепных передач, особенно в сельскохозяйственной технике, осуществляющей внесение удобрений и ядохимикатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Metzner D. Reibund und veschleiss bei Zahnriemengetrieb // Maschinenbautechnik. - 1984. - Vol. 33, №9. - S. 415-418.
2. Cicognani M. Zur Anvengung von Zahnriemen fur den Antrieb // Motortechnische Zeitschrift. - 1978. - Vol. 39, № 12. - S. 551 -556.
3. Пат. 3772929 (США), МКИ³ F16G5/00. Cog-belt and method for its production / Redmond John D. - Заявл. 14.10.71; Оpubл. 20.11.73.
4. Заявка № 63-24179 (Япония), МКИ³ F16G5/06, 1988. Зубчатый ремень.
5. Пат. 2624238 (Франция) МКИ³ F16G5/10, 1989. Perfectionnements aux courroies de transmission puis-sance / Jean-Michel Simon.
6. Пол. реш. ВНИИГПЭ по заявке № 4059035/25-28 (СССР), МКИ⁴ F16 G5/00. Зубчатый ремень / А.Т. Скойбеда, А.Г. Бондаренко, А.Н. Зуб, А.Н. Никончук, А.Н. Наталевич; Бел. политехн, ин-т; Заявл. 18.04.86.
7. А.с. 1449745 (СССР), МКИ⁴ F16G5/00 Зубчатый ремень / Скойбеда А.Т., Зуб А.Н., Наталевич А.Н.; Бел. политехи, ин-т; Заявл. 06.11.86; Оpubл. 07.01.89. Бюл. № 1 // Открытия. Изобретения. - 1993. - №30.
8. Заявка № 62-7416 (Япония), МКИ⁴ F16G5/06, 1987. Приводной ремень для передачи высоких нагрузок.
9. Заявка №60-84439 (Япония), МКИ³ F16G1/28. Power transmission belt / Jirov Watase, Yamaha Hatsudoki K.K.; Заявл. 15.10.83, Оpubл. 14.09.85.
10. Прогрессивные конструкции зубчатых ремней и технология их производства (Тематический обзор. Сер. Производство резинотехнических и асбестотехнических изделий) / Н.В. Лапшина, Ю.Н. Городничев, В.П. Бойков, Г.Г. Козачевский. - М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1987. - 55 с.
11. Международная заявка РСТ № 87/01779, МКИ⁴ F16G1/28. Courrois dentees / V.V. Guskov, G.G. Kozachevsky, V.P. Voikov etc.; Belor. polytechnical institut. - Заявл. 19.09.85; Оpubл. 26.03.87.
12. Козачевский Г.Г. Повышение долговечности зубчато-ременных передач: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Мн., 1985. - 181 с.
13. Doug McCormick. Getting step Ruth hybrid belts // Design Engineering. - 1981.- Vol. 52, № 4. - P. 19 - 26.
14. Баханович А.Г., Скойбеда А.Т., Баханович И.Г. Прогрессивные конструкции армированных зубчатых ремней // Современные методы проектирования машин: Республ. межведомств, сб. науч. тр.: В 7 т. Вып. 2. - Мн., 2004. - Т. 3: Проектирование приводов машин. - С. 174 - 179.
15. Баханович А.Г. Конструкции и технология производства приводных зубчатых ремней нового поколения // Сб. тр. молодых ученых НАН Беларуси. Т. 4. - Мн.: ИП Логвинов, 2004. - С. 152 - 157.
16. Скойбеда А.Т., Баханович А.Г. Новые конструкции и технология производства зубчато-ременных передач энергоемких приводов технологического оборудования // Белорусско-польский научно-практический семинар (г. Ольштын, Польша): Тез. докл. - Мн.: БЕЛІСА, 2004. - С. 129-131.
17. Баханович А.Г., Скойбеда А.Т., Баханович И.Г. Технология производства приводных зубчатых ремней с армированными зубьями // Современные методы проектирования машин: Республ. межведомств. сб. науч. тр.: В 7 т. Вып. 2. - Мн., 2004. Т. 5: Технология изготовления машин. - С. 55 - 60.
18. А.с. 1669756 (СССР), МКИ⁵ B29D29/08. Устройство для сборки бесконечных резиновых лент / А.И. Бобровник, А.Н. Никончук, А.Т. Скойбеда, М.И. Корженцевский; Бел. политех. ин-т. - № 4400460/05; Заявл. 30.03.88; Оpubл. 15.08.91, Бюл. № 30 // Открытия. Изобретения. - 1993. - № 30. - С. 54.
19. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. - М.: Едиториал УРСС, 2003. - 272 с.
20. Eringen A.C. Nonlinear theory of continuous media. - New York: McGrawHill Book Co., Inc., 1962. - 448 p.