

УДК 629.4.02:004.94

А. О. ШИМАНОВСКИЙ, Ю. Д. КАРАЦЮБА

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РЕЗИНОКОРДНОЙ МУФТЫ ЛОКОМОТИВА

Разработана объемная конечно-элементная модель резинокордной муфты в среде программного комплекса ANSYS Workbench. Выполнены расчеты ее напряженно-деформированного состояния под действием крутящего момента, приложенного к месту контакта с одним из металлических фланцев. Показано, что полученные области с высокими напряжениями с высокой степенью точности соответствуют местам наблюдаемых на практике повреждений, что подтверждает достоверность результатов, получаемых на основе применения разработанной модели.

Ключевые слова: резинокордная муфта, напряжения, деформации, конечно-элементное моделирование.

Резинокордная муфта (РКМ) используется для передачи крутящего момента на электропоездах серий ЭР, ЭД, ЭП, а также на некоторых локомотивах с гидравлической передачей. Благодаря своей упругости такая муфта снижает ударные нагрузки, возникающие при переходных режимах движения подвижного состава. Она также компенсирует несоосность соединяемых валов, допускает некоторый излом и перекося осей их валов за счет гибкости резинокордного элемента [1].

В процессе эксплуатации РКМ испытывают значительные импульсные, знакопеременные, высокочастотные периодические и непериодические нагрузки, которые ведут к появлению дефектов в резинокордных оболочках. Их появление связано с изменением жесткости конструкции, обусловленным старением материала, достижением температурой диссипативного разогрева критического уровня, возникновением усталостных трещин и достижением ими критических размеров, что в конечном счете ведет к потере несущей способности конструкции [2].

Анализ статистической информации об эксплуатации 177 секций тягового подвижного состава в локомотивных (моторвагонных) депо показал, что в течение 2024 года обнаружены следующие отказы:

- 39 случаев разрушения болтов крепления РКМ;
- 26 случаев разрушения резинокордного слоя.

Следует отметить, что в подавляющем большинстве случаев повреждения резинокордного слоя происходят со стороны фланца тягового электродвигателя, а болтов крепления – фланца тягового редуктора. Аналогичная ситуация наблюдалась при эксплуатации РКМ и на Латвийской железной дороге [3].

Аналізу динаміки приводів, включаючих РКМ, присвячено значительное количество публикаций. При этом в математических моделях используется

обобщенный коэффициент жесткости при кручении, который находится по результатам экспериментов [4–8]. Например, в работе [9] определены собственные частоты колебаний системы, включающей РКМ.

Значительный объем экспериментальных исследований, посвященных оценке ресурса резинокордных оболочек, используемых в железнодорожном подвижном составе, выполнен А. П. Евдокимовым [10–12]. В результате таких исследований разработаны рекомендации по сборке РКМ, позволяющие обеспечить надежность приводов в эксплуатации [13]. Установлены рациональные монтажные размеры, а также величины сжатия упругого элемента, которые позволяют обеспечить снижение динамической нагруженности.

Работ, в которых анализируется объемное напряженно-деформированное состояние расчетным способом, найти не удалось.

Проведенный анализ показал, что для выработки путей повышения долговечности конструкции РКМ требуется установление влияния различных факторов на напряжения в ее элементах. Чтобы учесть особенности деформирования резинокордного слоя, который имеет сложную геометрию, требуется применение компьютерного моделирования. Целью данной работы является разработка цифровых моделей, позволяющих осуществлять уточненное определение напряженно-деформированного состояния элементов РКМ при разных эксплуатационных режимах.

Эластичная муфта с торообразным резинокордным элементом представлена на рисунке 1. Она включает ведущий 1 и ведомый 5 фланцы, к которым крепится неразрезной резинокордный упругий элемент. Он, в свою очередь, состоит из каркаса 3, двух металлических колец 6, наружного 2 и внутреннего 4 защитных резиновых покрытий.

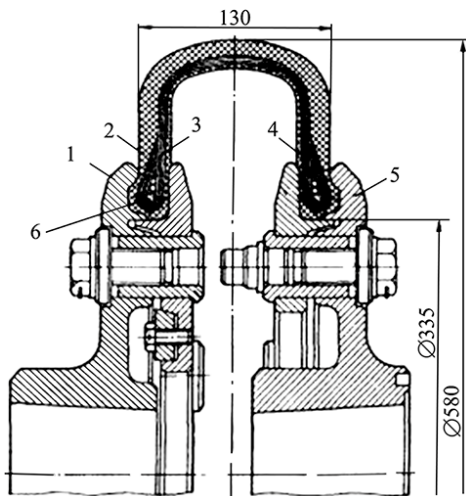


Рисунок 1 – Эластичная муфта с торообразным резинокордным элементом

Учитывая сложную геометрию резинокордного элемента, для определения его наиболее нагруженных участков возможно применение методов гомогенизации, а также иных приближенных моделей, используемых при расчетах автомобильных шин [14]. Например, корд может быть представлен в виде однородного кольца с заданными свойствами, с использованием моделей эффективного кордного волокна и эффективного резинокордного слоя и др.

Средствами программного комплекса ANSYS Workbench разработана геометрическая модель РКМ. При создании конечно-элементной модели использованы тетраэдральные элементы, механические характеристики материалов которых соответствовали армированной кордом резине и стали. Общее число элементов модели составило около 700 000. Выработана схема описания граничных условий, позволяющая с достаточной степенью точности учесть условия работы муфты [15]. К одному из фланцев был приложен закручивающий момент, а второй фланец жестко закреплен.

В результате расчетов определены напряжения и деформации в рассматриваемой муфте. На рисунке 2 приведена схема распределения эквивалентных по Мизесу напряжений, Па, из которой видно, что наибольшие напряжения возникают вблизи места крепления муфты к металлическому фланцу, то есть именно там, где на практике наблюдается разрыв резинокордного слоя [16]. Тем самым подтверждается достоверность результатов, получаемых с помощью разработанной модели.

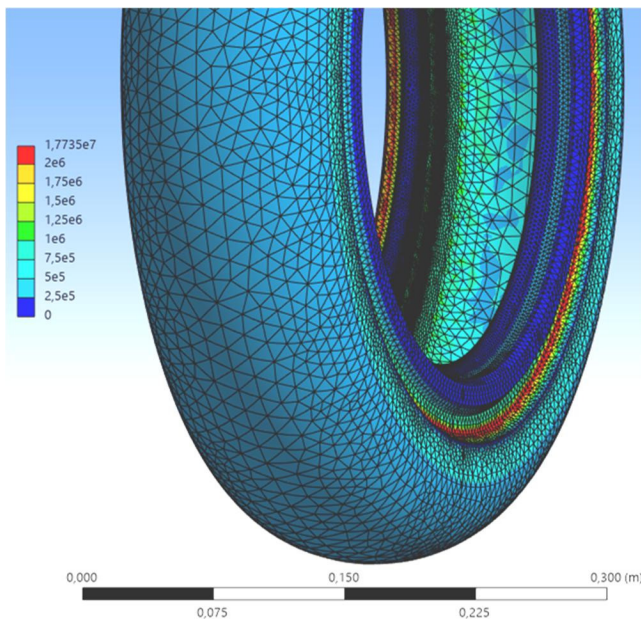


Рисунок 2 – Эквивалентные по Мизесу напряжения в РКМ

На рисунке 3 приведено распределение напряжений в поперечном сечении РКМ. Из нее видно, что значительные напряжения возникают в каркасе, а также вблизи мест присоединения резинокордного элемента к фланцам. Представленная на рисунке 4 схема распределения деформаций показывает, что наибольшие смещения наблюдаются в месте приложения крутящего момента, что полностью соответствует физике процесса.

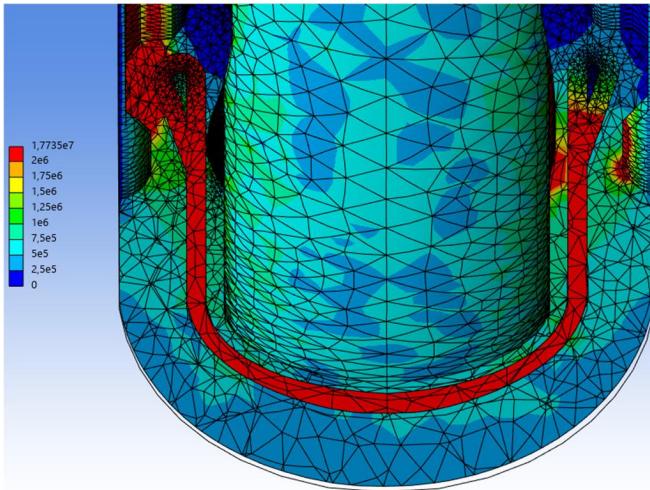


Рисунок 3 – Эквивалентные по Мизесу напряжения в поперечном сечении РКМ

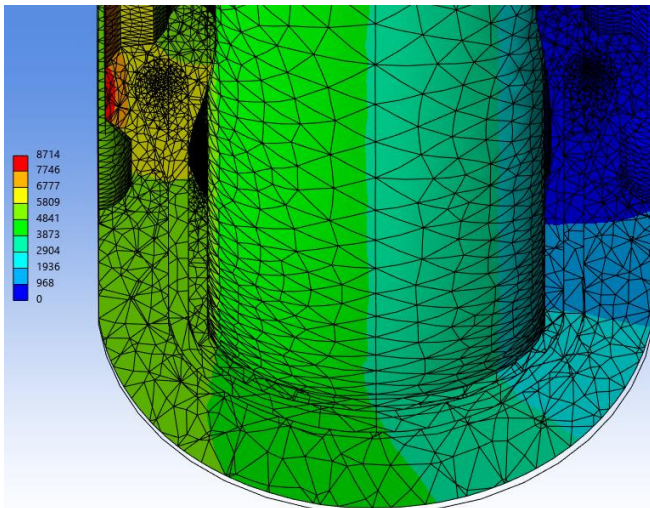


Рисунок 4 – Суммарная деформация РКМ, мкм

Таким образом, выполненные расчеты напряженно-деформированного состояния РКМ под действием крутящего момента, приложенного к месту контакта с одним из металлических фланцев показывают, что полученные области с высокими напряжениями с высокой степенью точности соответствуют местам наблюдаемых на практике повреждений, что подтверждает достоверность результатов, получаемых на основе применения разработанной модели. Ее использование для совершенствования конструкции наряду с повышением качества сборки позволит повысить надежность РКМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Электропоезд ЭР9Т: Руководство по эксплуатации. Книга 1 / Рижский вагоностроительный завод. – Рига, 1990. – 540 с.
- 2 **Евдокимов, А. П.** Экспериментальные исследования торовой резинокордной оболочки упругой муфты приводов тепловозов / *Машиностроение и инженерное образование*. – 2006. – № 2 (7). – С. 2–18.
- 3 Examining failures in rubber-cord couplings within ER2 series electric trains / P. Gavrilovs, D. Gorbacovs, J. Eiduks [et al.] // *Transport*. – 2024. – Vol. 34, is. 2. – P. 183–196.
- 4 Заполовський, М. Й. Моделювання тягового електропривода дизель-поїзда з урахуванням використання гумо-кордової муфти в процесі буксування колісних пар / М. Й. Заполовський, М. В. Мезенцев, М. В. Оліфір // *Системи управління, навігації та зв'язку*. – 2025. – Т. 1, № 79. – С. 23–30.
- 5 **Капустин, М. Ю.** Методы комплексного анализа динамической системы тягового привода локомотива / М. Ю. Капустин, Д. Н. Шевченко, О. В. Измеров // *Наука и техника транспорта*. – 2019. – № 2. – С. 15–21.
- 6 Классификация динамических явлений в тяговом приводе локомотива / Д. Я. Антипин, Д. А. Бондаренко, О. В. Измеров, М. А. Маслов // *Известия Транссиба*. – 2016. – № 3 (27). – С. 17–23.
- 7 Применение объектной модели для конструирования тягового привода локомотива / А. С. Космодамианский, Д. Я. Антипин, М. А. Маслов, Д. Н. Шевченко // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2019. – № 10 (83). – С. 39–47.
- 8 Разработка опорно-осевого привода пассажирских электропоездов с асинхронными тяговыми двигателями / А. А. Пугачев, В. И. Воробьев, О. В. Измеров, Е. В. Николаев // *Транспортное машиностроение*. – 2023. – № 3 (15). – С. 45–58.
- 9 Methodology for evaluating the dynamic parameters of the rubber-cord shell of a high-speed rolling stock pneumatic spring in the wheel-frog interaction of a railroad switch / A. Kuzyshyn, V. Kovalchuk, Y. Royko [et al.] // *Archives of Transport*. – 2025. – Vol. 73, is. 1. – P. 35–52.
- 10 **Евдокимов, А. П.** Исследование температурных полей резинокордных оболочек силовых приводов подвижного состава / А. П. Евдокимов // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. – 2022. – № 28. – С. 13–17.
- 11 **Evdokimov, A. P.** Stress-strain behavior and specific friction of toric rubber-cord casings of flexible couplings / A. P. Evdokimov, T. Sh. Shikhnabieva // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2017. – Vol. 46, is. 2. – P. 199–203.

12 **Евдокимов, А. П.** Исходный и остаточный ресурс резинокордных оболочек соединительных устройств подвижного железнодорожного состава / А. П. Евдокимов // *Globus: Технические науки.* – 2021. – Т. 7, № 2 (38). – С. 25–30.

13 **Евдокимов, А. П.** Технологические решения по снижению осевых нагрузок резинокордной оболочки соединительной муфты приводов / А. П. Евдокимов // *Сборка в машиностроении, приборостроении.* – 2024. – № 5. – С. 212–214.

14 **Можаровский, В. В.** О расчете напряженного состояния массивных шин на примере модели цилиндра из армированного материала с учетом элементов вязкоупругости / В. В. Можаровский // *Известия ГТУ им. Ф. Скорины.* – 2010. – № 5. – С. 109–114.

15 **Шимановский, А. О.** Влияние условий закрепления контура сэндвич-панелей на их напряженно-деформированное состояние / А. О. Шимановский, И. Е. Кракова // *Механика. Исследования и инновации.* – 2020. – Вып. 13. – С. 183–188.

16 **Шимановский, А. О.** Конечно-элементное моделирование работы резинокордной муфты локомотива под нагрузкой / А. О. Шимановский, Ю. Д. Карацуба // *Проблемы безопасности на транспорте : материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. пятилетке качества (Гомель, 20–21 ноября 2025 г.) : в 2 ч. Ч. 1.* – Гомель : БелГУТ, 2025. – С. 132–133.

A. O. SHIMANOVSKY, Yu. D. KARATSUBA

Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus

FINITE ELEMENT MODELING OF A LOCOMOTIVE RUBBER-CORD COUPLING STRESS-STRAIN STATE

A 3D finite element model of a rubber-cord coupling is developed using the ANSYS Workbench software package. There are performed the calculations of the coupling stress-strain state under the action of a torque applied to the contact point with one of the metal flanges. It is shown that the resulting high-stress areas accurately correspond to the locations of damage observed in a practice, confirming the reliability of the results obtained using the developed model.

Keywords: rubber-cord coupling, stress, strain, finite element modeling.

Получено 10.10.2025