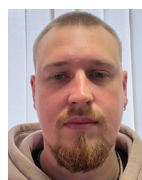


Модернизация сферических резинометаллических шарниров для экипажной части локомотива



Д. Н. Шевченко,
канд. техн. наук, доцент
кафедры «Тяговый подвижной состав»
Российской открытой
академии транспорта
Российского университета
транспорта (РОАТ РУТ
(МИИТ)),



Е. Г. Максаев,
ассистент кафедры
«Тяговый подвижной
состав» РОАТ РУТ
(МИИТ),



О. В. Измеров,
канд. техн. наук

Вопрос предотвращения случаев отслоения резинового элемента от металлических обойм в сферическом резинометаллическом шарнире с продольным разъемом является в локомотивном хозяйстве весьма актуальным. Предлагается модернизировать выпускаемый шарнир путем изменения формы выемки. Также в качестве перспективного решения целесообразно разработать модификацию изделия с радиальными разрезами наружной обоймы.

В ряде статей [1–3] авторами рассмотрены вопросы проектирования, расчета и моделирования двухслойных сферических резинометаллических шарниров (РМШ), имеющих более высокую нагрузочную способность по сравнению с однослойными, нашедшими применение на современном подвижном составе. Вместе с тем очевидно, что в перспективе будет расширяться и сфера применения технологически более простых однослойных сферических РМШ, нагрузочная способность которых может оказаться достаточной для ряда узлов.

При этом в эксплуатации ряда отечественных локомотивов зафиксированы факты выхода из строя сферических РМШ, выражающиеся в отслоении рези-

нового элемента от наружной обоймы и выдавливании резины за торец поводка [4–6]. В связи с этим возникает проблема поиска путей повышения нагрузочной способности и долговечности для однослойных сферических резинометаллических шарниров.

Достоинства и недостатки конструкции резинометаллических шарниров

Впервые для экипажной части отечественных локомотивов сферические РМШ разработаны и испытаны АО «ВНИКТИ» в 80-х годах прошлого века для применения в перспективных тепловозах [7, 8]. Несмотря на выявленные технические явные преимущества перед цилиндрическими шарнирами, ввиду большей сложности изготовления сферические РМШ в настоящее время применяются в России только на локомотивах, разработанных после 1991 г.

Наиболее распространенным является сферический резинометаллический шарнир с диаметром наружной втулки 120 мм, поперечным разъемом, без отверстия во внутренней втулке, применяемый в буксовых поводках и подвесках электровозов 2ЭС10, 2ЭС6 и др. производства АО «Синара-Транспортные машины» и тепловоза 2ТЭ25А производства АО «Трансмашхолдинг». Несмотря на то, что чертежи, по которым изготавливается данный шарнир для указанных предприятий, носят разные наименования, по размерам и свойствам изделия идентичны (рис. 1).

Конструкция сферического РМШ относительно проста и технологична по сравнению с трехсегментными шарнирами с радиальными разрезами, нашед-

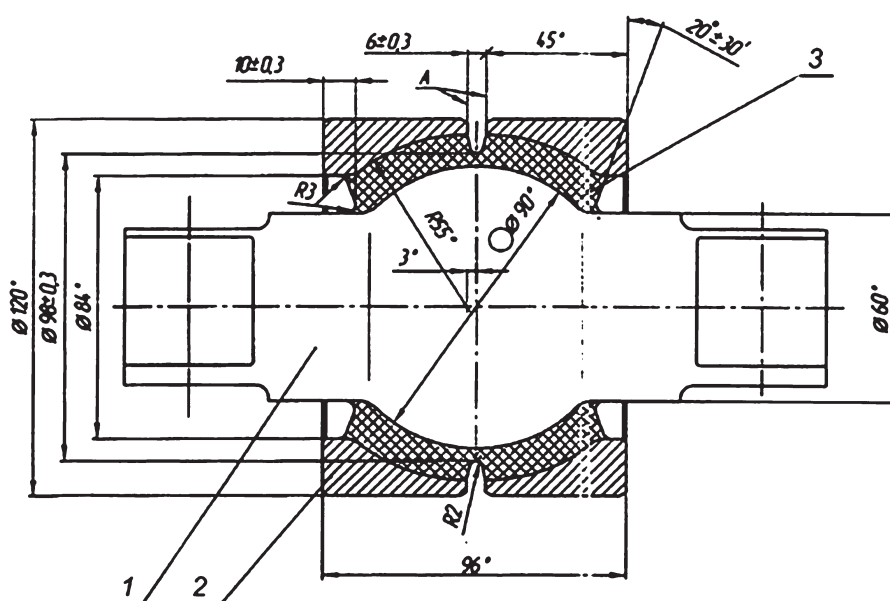


Рис. 1. Сферический резинометаллический шарнир: 1 – внутренняя обойма; 2 – наружная обойма; 3 – резиновая втулка

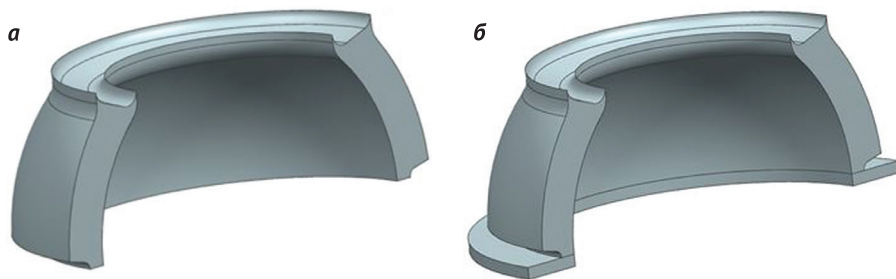


Рис. 2. Твердотельная трехмерная модель резинового слоя четверти шарнира: а – без условного упорного тела; б – с условным упорным телом

шими широкое применение за рубежом. Он удобен для изготовления в пресс-форме методом литья и прост для монтажа, поскольку не требует специальных приспособлений для предварительного сжатия частей наружной обоймы (оно происходит при запрессовке обойм в деталь). Отсутствие радиальных разъемов наружной обоймы облегчает обработку ее поверхности для обеспечения гарантированного натяга при сборке.

Все это дает основания считать, что выбор данной конструкции в период освоения производства сферических РМШ в России без достаточного собственного опыта или закупки зарубежных технологий является рациональным, поскольку позволяет быстро получить конечный результат, пригодный для использования на серийных локомотивах.

К недостаткам рассматриваемой конструкции относится то, что предварительная деформация сжатия резинового элемента, необходимая для того, чтобы исключить при работе шарнира деформации растяжения, ведущие к возникновению трещин [9], создается за счет сдвига половин наружных обойм относительно внутренней, что требует втрое большего перемещения обойм по сравнению с созданием предварительной деформации путем радиального перемещения. В данном случае относительная деформация резинового слоя в 10% создается не путем радиального смещения обойм на 1 мм, а сдвига каждой из обойм к середине шарнира на 3 мм.

Касательные напряжения в резине в месте вулканизации без учета выдавливания резины в стороны от выемки для рассматриваемого шарнира должны составить 2,8 МПа, в то время как прочность соединения резины, применяемой для отечественных РМШ, с металлом с помощью клея «Лейконат» для разных резиновых смесей составляет от 3 до 10 МПа [1, 10].

В случае выдавливания резины в стороны от выемки величина касательных напряжений в месте вулканизации рези-

ны с металлом будет возрастать. Все это указывает на необходимость дальнейших исследований деформаций резины и напряженного состояния резинового слоя данного шарнира.

Исследование деформаций резинового слоя при сборке шарнира

Исследования проводились с помощью математического моделирования деформаций методом конечных элементов. Их методика изложена в [1–3]. Для решения данной задачи разработана конечно-элементная модель ¼ шарнира. Как было показано в данных работах, деформация металлических обойм шарнира практически не влияет на результаты из-за высокой относительной жесткости обойм, в связи с чем обоймы шарнира решено не моделировать, а заменить их жесткими связями (рис. 2, а).

Для ограничения перемещения узлов поверхности выреза в модель введено условное упорное тело, которое должно контактировать с выпучивающейся резиной (рис. 2, б). Разбиение на конечные элементы модели резинового слоя осуществлялось с применением тетраэдральных черырехузловых конечных элементов. Размер сетки составил 1 мм. Условное упорное тело моделировалось восьмиузловыми тетраэдральными конечными элементами с шагом сетки 1 мм (рис. 3, а).

Исходя из допущения, что для шарнира, симметричного относительно плоскости, проходящей через середину шарнира и перпендикулярной его продольной оси, перетекание резины при монтаже шарнира из одной половины в другую не будет происходить ввиду одинаковых перемещений наружных полуобойм, создающих равные усилия в обеих частях резинового элемента, условному упорному телу назначена модель материала «Сталь» с модулем упругости $E=210\,000$ МПа и коэффициентом Пуассона $\mu=0,3$, что соответствует практическому отсутствию деформации условного упорного

тела. Согласно конструкторской документации, на шарнир резинового слоя назначены параметры жесткости, соответствующие резине с твердостью 60 НВ, $E=2,7$ МПа и коэффициентом Пуассона $\mu=0,499999$.

На конечно-элементную модель накладывалось условие контактного взаимодействия поверхности выреза с сеткой упорного тела (рис. 3, б). На нижнюю грань упорного тела и внутреннюю поверхность резинового слоя накладывалось ограничение «фиксации» — жесткого закрепления узлов, принадлежащих опорной грани. Узлы наружной грани резинового слоя фиксированы по пяти степеням свободы кроме направления смещения наружного кольца. В этом направлении узлам назначено принудительное перемещение на величину половины выреза в шарнире — 3 мм. На грани резинового тела расположенные по плоскостям разреза шарнира наложены симметричные связи, компенсирующие воздействие отсеченной части.

Результаты моделирования приведены на рис. 4 и 5, где показаны общий вид резинового слоя после деформации и деформация свободной поверхности резинового слоя.

Как видно из рис. 5, а, при смыкании обойм объем выемки недостаточен, и резина должна была бы проникнуть в условное упорное тело. Поскольку это невозможно, она будет выдавливаться от места сомкнувшейся выемки в сторо-

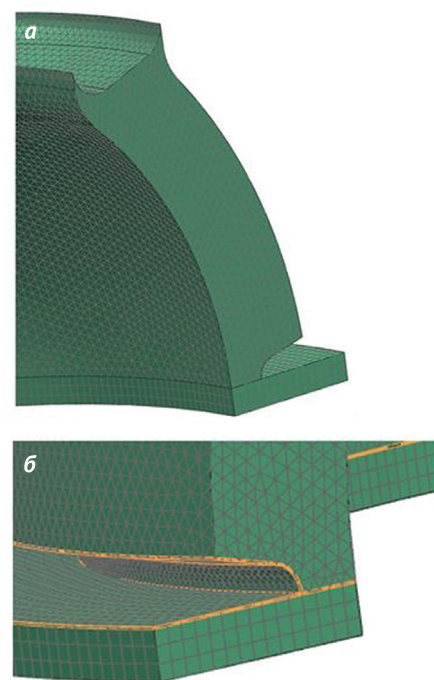


Рис. 3. Конечно-элементная сетка на телах модели (а) и поверхности, участвующие в моделировании контактного взаимодействия (б)

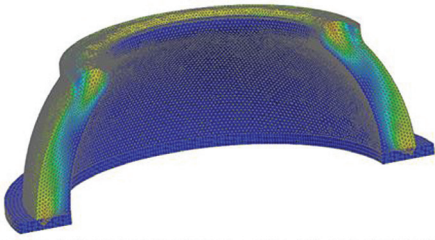


Рис. 4. Результат расчета деформаций резинового слоя при перемещении наружной обоймы на 3 мм, что соответствует смыканию зазора между обоймами

ну свободных поверхностей, что ведет к росту касательных напряжений на поверхности, где резиновый слой привулканизирован к металлическим обоймам.

Как видно на рис. 5, б, форма свободной поверхности шарнира в виде конуса с закруглениями по краям при смыкании обойм не предотвращает возникновения выпучивания, в зоне которого в резиновом слое возникают деформации растяжения, ведущие при циклическом нагружении к появлению усталостных трещин. При этом выдавливание резины от выемки к свободным поверхностям усиливает выпучивание.

Таким образом, возникает вопрос, какой должна быть теоретическая форма выемки, при которой не будет выдавливания резины в сторону свободной поверхности (от этого также будет зависеть и рациональная форма свободной поверхности резинового слоя до сборки шарнира).

Поиск рациональной формы выемки в резиновом слое

Общепринятой методики проектирования сферических РМШ с поперечным разъемом, в частности, общепринятых методов выбора формы выемки между частями наружной обоймы, не существует. В 80-х годах прошлого века на основании исследований, проведенных В. С. Коссовым в АО «ВНИКТИ» с использованием двумерной конечно-элементной модели резинового слоя (имеющиеся тогда возможности вычислительной техники не позволяли реализовать трехмерную модель), предложена и запатентована следующая форма выемки, описываемой функцией квадратного корня [11]:

$$B = \frac{2h \cdot \Delta_p}{\sin \frac{\alpha}{2}} \left(1 - \frac{8}{3} \frac{\delta}{R \sin^2 \frac{\alpha}{2}} \right)^{0,5},$$

где B — ширина выемки на расстоянии δ мм от плоскости, параллельной продольной оси шарнира и касательной к обоим сферическим поверхностям колец, мм;

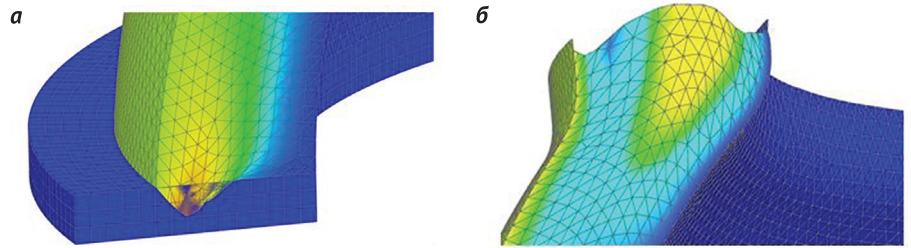


Рис. 5. Отсутствие реального контактного взаимодействия в зоне соединения конечных элементов сеток (а) и выпучивание свободной поверхности резинового слоя (б)

α — угол раскрытия резинового элемента, определяемый вертикальной осью симметрии шарнира и прямой, проходящей через центр шарнира и торец внутренней поверхности кольца, град.;

R — радиус наружной сферической поверхности элемента, мм;

h — толщина резинового элемента, мм;

Δ_p — предварительная радиальная деформация резины, относительная величина, $\Delta_p \leq 0,5$.

Указанная форма выемки получена в результате аппроксимации результатов математического моделирования деформации резинового слоя шарнира при раздвигании частей наружных обойм на расстояние, равное зазору между обоймами до монтажа шарнира. При этом поверхность резинового слоя в зоне выемки до раздвигания полагалась плоской. Решено использовать аналогичный подход и для трехмерной конечно-элементной модели.

Построена трехмерная модель шарнира со сдвинутыми кольцами в начальном положении с последующим разбиением на объемные тетраэдральные конечные элементы с шагом конечно-элементной сетки, равным 1 мм (рис. 6).

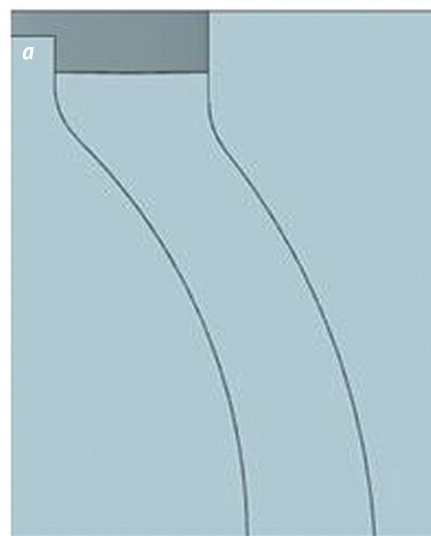


Рис. 6. Поперечное сечение модели шарнира в исходном положении (а) и результат разбиения на конечные элементы (б)

В результате разбиения нижний край имеет границу, на которой расположены 10 элементов, имеющих равный промежуток между узлами по краю свободной поверхности, а закрепление конечно-элементной модели в пространстве осуществляется жесткими связями по поверхности, привулканизированной к неподвижному кольцу (рис. 7).

Узлам со стороны наружной обоймы добавлено вынужденное перемещение, равное 3 мм в вертикальном направлении, а на отсеченные поверхности упругого кольца наложены симметричные связи, компенсирующие влияние отсеченной части (рис. 8). Жесткостные параметры резины приняты те же, что указанные ранее.

На рис. 9 показан общий вид деформированного резинового слоя и его сечения в плоскости продольной оси. Чтобы избежать выдавливания излишков резины в сторону свободной поверхности, выемка в резиновом элементе должна доходить до внутренней обоймы шарнира и иметь вогнутую форму. Аналогично вогнутую форму без конических участков должна иметь и свободная по-

Координаты перемещений узлов в зоне выемки

Номер узла	Координата Y, мм	Координата Z, мм	B по формуле, мм
1	000,000E+0	000,000E+0	000,000E+0
2	-1,005E+0	1,168E+0	1,072E+0
3	-2,042E+0	2,247E+0	1,434E+0
4	-3,122E+0	3,144E+0	1,731E+0
5	-4,105E+0	3,775E+0	1,963E+0
6	-5,053E+0	4,215E+0	2,164E+0
7	-6,140E+0	4,500E+0	2,373E+0
8	-7,153E+0	4,662E+0	2,551E+0
9	-8,060E+0	4,277E+0	2,703E+0
10	-8,978E+0	3,683E+0	2,847E+0
11	-9,918E+0	3,000E+0	2,988E+0

верхность перед монтажом шарнира. На *рис. 10* и в *таблице* приведены полученные значения перемещений узлов в горизонтальном и вертикальном направлении, а на *рис. 11* — аппроксимация формы поверхности полиномами 2 и 3 степени:

$$y = 0,1117x^2 + 1,6583x - 1,6577; \quad (2)$$

$$y = 0,0029x^3 - 0,06x^2 + 1,3988x - 1,3435, \quad (3)$$

где y — вертикальное перемещение узла;

x — номер узла.

Также в *таблице* приведены расчетные значения ширины выемки B , полученные по формуле, в которой значения α , R , h приняты согласно *рис. 1*, а значение Δr принято равным 0,10605, исходя из условия, что для рассматриваемого шарнира максимальное значение $B=3$ мм.

Как видно из *таблицы*, координаты выемки по итогам моделирования и, полученные в результате расчета по формуле, существенно различаются, что указывает на значительное расхождение результатов моделирования деформаций резинового слоя сферического РМШ с помощью двумерной и трехмерной моделей и на необходимость в дальнейшем рассматривать только трехмерные конечно-элементные модели шарнира.

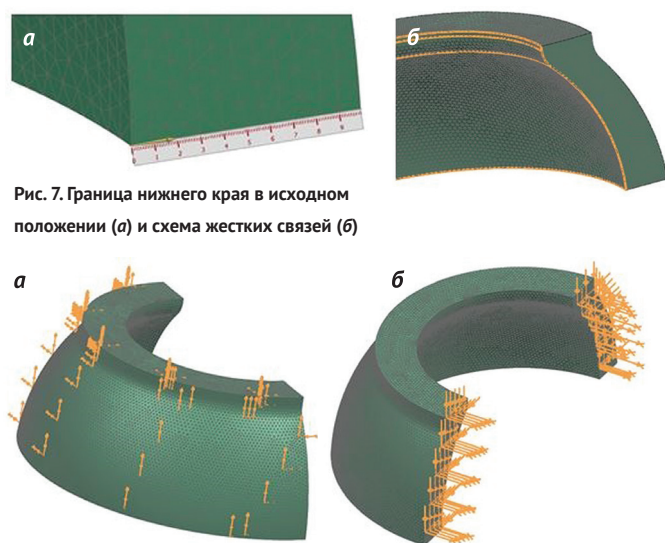


Рис. 7. Граница нижнего края в исходном положении (а) и схема жестких связей (б)

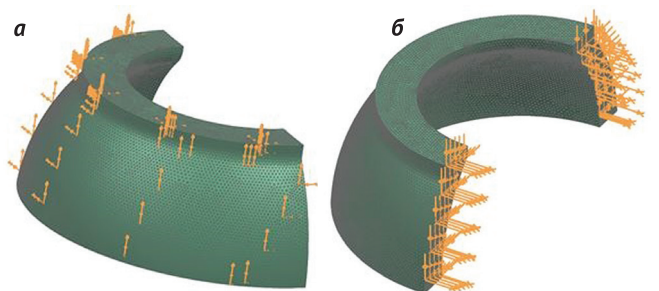


Рис. 8. Схемы перемещения узлов со стороны наружной обоймы (а) и симметричных связей для компенсации отсутствующей части резинового элемента (б)

Предлагаемые решения

На основании данных, полученных на математической модели, предлагается модернизировать существующую конструкцию сферического РМШ по *рис. 1*, изменив форму выемки в соответствии с приведенными результатами моделирования.

Как видно из *рис. 10 а, б*, полученные выемки содержат поднутрения глубиной до 2 мм, что затрудняет извлечение шарнира из пресс-формы. Кроме того, выемка должна доходить до внутренней обоймы РМШ, что затрудняет заполнение пресс-формы резиновой массой при расположении литников с одной стороны изделия.

Технически проблема изготовления шарнира с выемкой, имеющей поднутрения, может быть просто решена путем введения операции механической обработки выемки после изготовления РМШ, что увеличивает трудоемкость работ, однако позволяет обойтись без изменения пресс-формы. С другой стороны, результаты исследования свидетельствуют о необходимости технологических мер повышения прочности соединения резины с металлом путем вулканизации, например, посредством латунирования поверхностей обойм, дробеструйной обработки, использования промоторов адгезии и т. п.

Для дальнейшего снижения касательных напряжений в местах соединения резины с металлом предлагается на базе выпускаемого сферического РМШ разработать его модификацию с радиальными разрезами, в которых наружная обойма состоит из двух или трех сегментов. В этом случае величина зазора между частями наружной обоймы перед сборкой, как указано в [1], можно сократить с 6 до 2 мм, что подтверждает внешний вид аналогичных шарниров, выпускаемых зарубежными производителями (*рис. 12*).

Поскольку внутренняя втулка шарнира крепится к деталям экипажной части клиновыми соединениями и, соответственно, должна быть ориентирована определенным образом по отношению к поводку, в который запрессовывается РМШ, то в рассматриваемом случае будет достаточно, чтобы наружная обойма состояла из двух половин, а плоскость разреза была перпендикулярна осевой линии поводка.

Следует отметить, что целесообразность разработки в дальнейшем сферического РМШ с радиальным разрезом констатирована участниками соответствующих работ в АО «ВНИКТИ» еще в 80-е годы. При этом создание отечественного сферического РМШ с радиальными разрезами позволит полностью

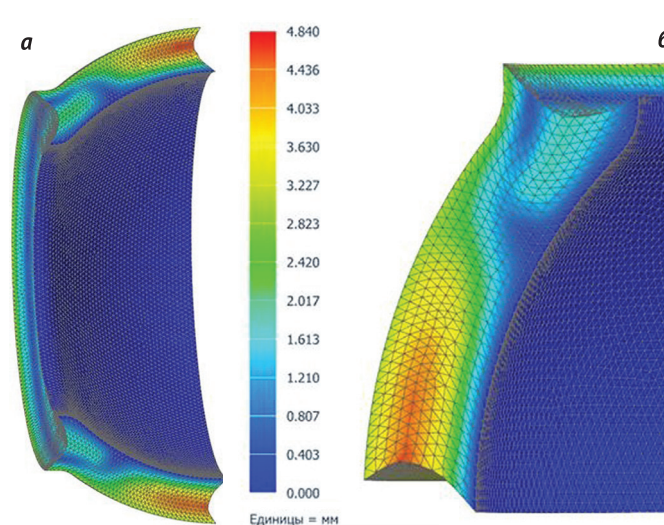


Рис. 9. Общий вид полученной формы резинового элемента (а) и вид сечения резинового элемента в плоскости продольной оси шарнира (б)

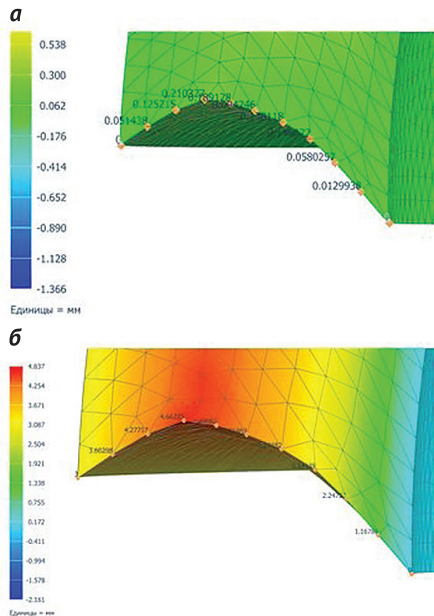


Рис. 10. Перемещения узлов в зоне выемки:

а – в горизонтальном направлении; б – в вертикальном направлении

ликвидировать потребность в импорте подобных комплектующих для транспортного машиностроения.

Выводы

1. В результате анализа характера повреждаемости сферических резино-металлических шарниров с продольным разъемом наружной обоймы, используемых на отечественных грузовых локомотивах, установлена необходимость анализа рациональности формы выемки резинового элемента шарнира.

2. В результате исследований трехмерной конечно-элементной модели РМШ обнаружено, что существующая форма выемки при смыкании половин наружных обойм в процессе сборки шарнира должна приводить к выдавливанию резины в сторону свободных поверхностей резиновой втулки, что увеличивает касательные напряжения в местах соединения втулки к металлическим обоймам и повышает опасность наблюдаемого в эксплуатации ее отслоения.

3. Определена рациональная форма выемки сферического РМШ, которая не вызывает перетекания резины в сторону свободных поверхностей. Установлено, что данная форма выемки имеет поднутрения глубиной около 1,5 мм в каждую сторону выемки, что усложняет разъем пресс-формы после изготовления шарнира, а сама выемка должна доходить до внутренней обоймы, что препятствует изготовлению шарнира методом литья при заливке резиновой смеси с одной стороны.

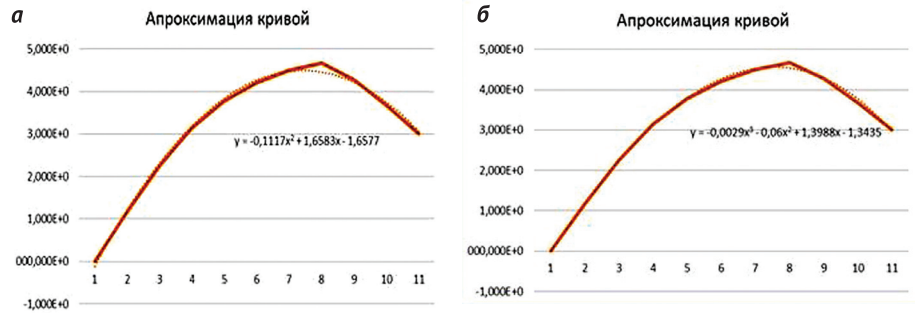


Рис. 11. Аппроксимация перемещений узлов в зоне выемки с помощью полинома второй (а) и третьей степени (б)

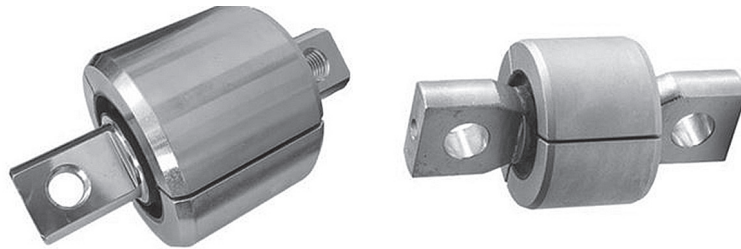


Рис. 12. Примеры конструкции сферических РМШ с радиальными разрезами (сегментированных шарниров) фирмы GMT rubber (Великобритания)

4. Предложено модернизировать выпускаемый сферический РМШ путем изменения формы выемки в резиновом слое без переделки существующей технологической оснастки с помощью механической обработки выемки после вулканизации.

5. В целях дальнейшего повышения надежности и долговечности изделия на подвижном составе предложено разработать модификацию выпускаемого сферического РМШ с радиальными разрезами наружной обоймы. ■

Источники

1. Космодамианский А. С., Воробьев В. И., Измеров О. В. и др. Двухслойные сферические резинометаллические шарниры и проблемы расчета их характеристик // Вестник ВНИИЖТ. 2022. Т. 81. № 2. С. 114–124.
2. Космодамианский А. С., Воробьев В. И., Измеров О. В. и др. Вопросы создания равнопрочных двухслойных сферических резинометаллических шарниров // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 1 (104). С. 22–30.
3. Воробьев В. И., Злобин С. Н., Измеров О. В. Использование двухслойных резинометаллических шарниров на высокоскоростном подвижном составе // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2024. № 1 (363). С. 96–104.
4. Соколов Ю. Н., Пономарев А. С., Дегтярев В. Е. Повышение надежности узлов тягового привода пассажирских электровозов ЭП1М и ЭП10 // Локомотивинформ. 2010. № 6. С. 4–11.

5. Алексеева М. С. Анализ работы тепловозов серии 2ТЭ25А «Витязь» на Дальневосточной железной дороге // Технические науки – от теории к практике: сб. ст. по матер. LVIII междунар. науч.-практ. конф. Новосибирск: СибАК, 2016. № 5(53). Ч. II. С. 61–66.
6. Ахмадеев С. Б., Корнев А. М. Анализ повреждений механической части электровозов нового поколения в эксплуатации (на примере 2ЭС6) // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава. Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2015. Ч. 1. С. 203–208.
7. Исследования по созданию подвески тягового электродвигателя со сферическими резинометаллическими шарнирами для тепловозов с опорно-осевым приводом. Заключительный отчет // Отчет ВНИТИ И-17–85. Коломна, 1985. 55 с.
8. Результаты стендовых испытаний подвесок редуктора тягового привода тепловоза 2ТЭ121. Заключительный отчет // Отчет ВНИТИ И-101–87. Коломна, 1987. 68 с.
9. Потураев В. Н. Резиновые и резинометаллические детали машин. М.: Машиностроение, 1966. 299 с.
10. Пенкин Н. С., Копченков В. Г., Сербин В. М., Пенкин А. Н. Гуммированные детали машин. М.: Машиностроение, 2013. 245 с.
11. Патент СССР № 14903807. Способ сборки сферического резинометаллического шарнира / В. С. Коссов, А. И. Кокорев, В. А. Лысак и др. Опубл. 15.07.89. Бюл. № 26.