

УДК 621.891

Инж. Е. И. ГЕРШМАН, д-р техн. наук И. С. ГЕРШМАН, канд. техн. наук А. Е. МИРОНОВ

Влияние формы токосъемных элементов на углеродной основе на износостойкость и стабильность токосъема

Аннотация. Рассмотрен вопрос об альтернативной форме токосъемных элементов. Изменение традиционной формы анализируется с точки зрения повышения износостойкости и надежности скользящих электрических контактов токосъемного узла. В работе показано влияние формы токосъемных элементов на углеродной основе на аэродинамические и трибологические характеристики. На основе полученных данных разработана альтернативная форма, позволяющая снизить интенсивность изнашивания и увеличить стабильность токосъемного узла. Показано, что аэродинамическая форма токосъемных элементов позволяет уменьшить их повреждаемость и интенсифицировать их охлаждение. В работе использован подход, основанный на неравновесной термодинамике и теории самоорганизации.

Ключевые слова: трение; износостойкость; токосъемные вставки; аэродинамическая форма; термодинамические и кинетические факторы

Введение. Интенсивное развитие высокоскоростного электрифицированного железнодорожного транспорта, рост скорости движения, значительное увеличение потребляемой мощности, а значит, и снижаемого тока привели к значительному увеличению интенсивности изнашивания токосъемной пары: токосъемные элементы — контактный провод.

Проблему повышенного износа токосъемной пары в основном пытаются решить с помощью разработки новых материалов. Задача традиционно решается за счет улучшения какого-либо из свойств (удельное электрическое сопротивление или механические свойства [1–7]). Однако улучшение таких свойств может вызвать ухудшение эксплуатационных характеристик.

В [8] показано, что повысить износостойкость токосъемных элементов можно, воздействуя на характеристики, непосредственно связанные с трением и изнашиванием. Снижение интенсивности изнашивания связано с прохождением на поверхности трения несамостоятельных реакций:



Снижение интенсивности изнашивания при прохождении процессов типа (1) и (2) связано с тем, что они протекают с увеличением свободной энергии. Нахождение таких процессов затрачивает часть энергии трения, следовательно, снижается

доля энергии трения, которая затрачивается на изнашивание. Интенсификация таких процессов приведет к увеличению по абсолютной величине отрицательного производства энтропии, а это приведет к снижению общего производства энтропии и, соответственно, к снижению интенсивности изнашивания. Увеличить скорость несамостоятельной химической реакции типа (1), а следовательно, снизить интенсивность изнашивания можно, повысив парциальное давление газа — реагента CO_2 , который образуется при кислородном окислении углерода токосъемной вставки. Следовательно, для увеличения давления CO_2 достаточно повысить давление кислорода в зоне трения.

Увеличение давления кислорода в зоне трения может быть достигнуто при помощи применения альтернативной формы токосъемных элементов по отношению к стандартному профилю 2А. Оптимизация формы токосъемных элементов рассмотрена в данной статье.

Отсюда вытекает задача, поставленная в данной работе, — создание обтекаемой формы токосъемной вставки для обеспечения максимально возможного давления воздуха в зоне контакта.

Отметим, что в мире такая задача не ставилась. Например, при скорости движения около 100 км/ч подъемная сила, действующая на полоз токоприемника, достигает около 100 Н [9]. Статическое нажатие полоза токоприемника в зависимости от типа токоприемника, типа вставок и сезона составляет от 90 до 140 Н. Таким образом, появляющаяся при движении подъемная сила увеличивает усилие прижатия в 1,7–2,1 раза. Исследования токоприемников с точки зрения снижения их аэродинамического сопротивления проводились во многих странах. Но нас будет интересовать совместная аэродинамическая форма токосъемных элементов и полоза токоприемника с точки зрения возможности снижения интенсивности изнашивания токосъемных вставок и контактного провода.

Японские исследователи проводили исследования с 70-х гг. прошлого века по аэродинамике полоза токоприемника с точки зрения снижения его шума при движении поезда [10]. Исследования направлены на снижение подъемной силы токоприемника за счет создания определенной аэродинамической формы его частей.

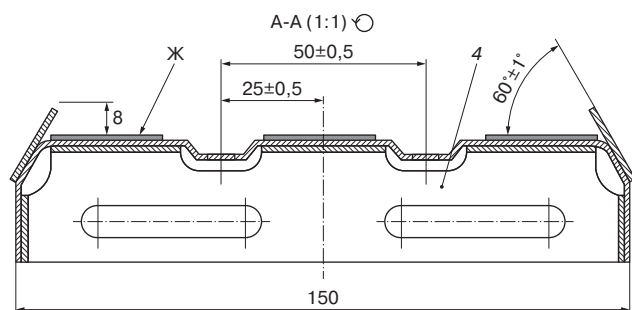


Рис. 1. Сечение каркаса полоза

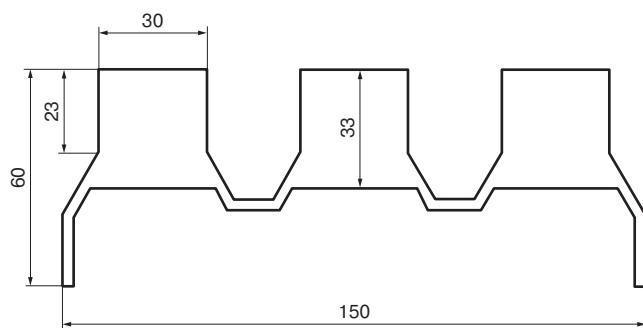


Рис. 2. Геометрия сечения полоза токоприемника при задании варианта расчета в ПК FlowVision

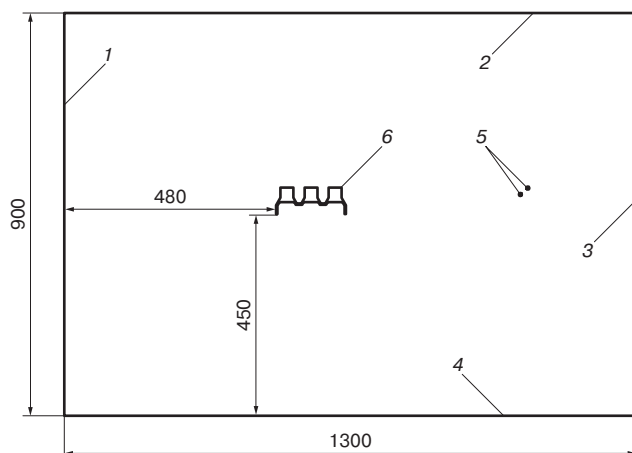


Рис. 3. Расчетная область при расчете поля течения вокруг полоза

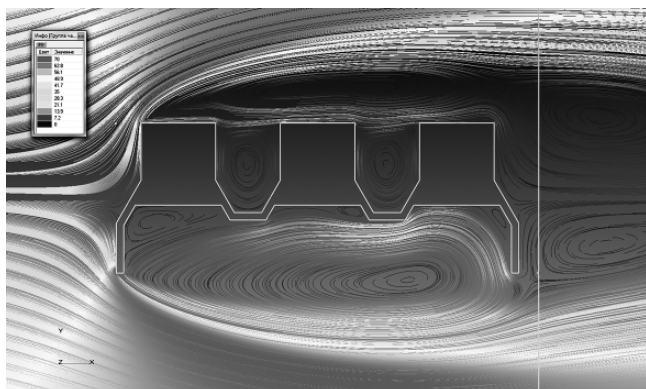


Рис. 4. Картина линий тока вокруг сечения базового полоза и распределение скоростей потока, м/с

В [11] с помощью аэродинамических расчетов получена оптимальная форма полоза токоприемника с токосъемной вставкой. Оптимизация проводилась с точки зрения снижения аэроакустического шума и сохранения аэродинамической стабильности.

В [12] представлена новая конструкция полоза токоприемника. В этом полозе воздух проходит через него, входя в сквозные отверстия на набегающем конце и выходя из него снизу ближе к сбегающему концу полоза. Таким образом контролируется подъемная сила полоза. Приведено распределение давления по поверхности полоза токоприемника.

Указанная выше и другие работы касались только снижения шума от токоприемника с помощью аэродинамических методов. Отмечено отсутствие влияния на износ.

Разработка альтернативной формы полоза токоприемника. Аэродинамическая оценка полоза токоприемника со вставками проводилась с помощью программного комплекса Flowvision.

В качестве прототипа для проектирования перспективного токосъемного элемента выступил полз токоприемника. Сечение каркаса полоза показано на рис. 1.

Рассчитывался вариант при следующих параметрах набегающего потока: $v_{\infty} = 50$ м/с (180 км/ч), $T = 273$ °K (0 °C), температура поверхности полоза $T_{\text{пов}} = 673$ °K (400 °C).

При задании геометрии полоза для исследуемого варианта использовалось сечение, изображенное на рис. 2.

Сечение соответствует упрощенному сечению каркаса полоза с установленными токосъемными вставками. Заданная расчетная область показана на рис. 3.

Задавались следующие граничные условия:

- позиция 1 — условие «Вход/Выход», нормальная скорость 50 м/с, среда — воздух, $T = 273$ °K (0 °C), $P = 101$ кПа, турбулентность: пульсация — 0,05 %, масштаб — 0,0025 м;
- позиции 2, 3, 4 — условие «Свободный выход»;

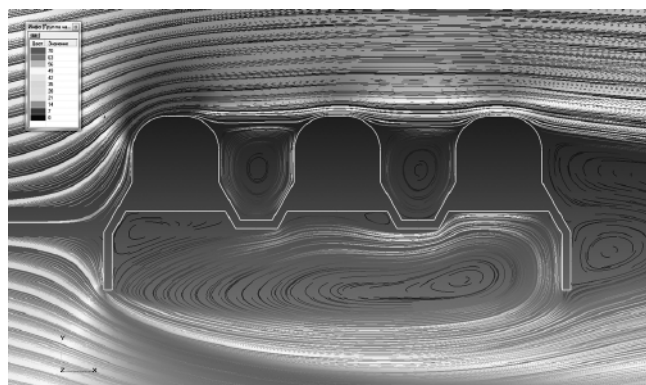


Рис. 5. Картина линий тока вокруг сечения альтернативного полоза и распределение скоростей потока, м/с

- позиция 5 — условие «Симметрия»;
- позиция 6 — условие «Стенка», логарифмический закон, $T_{\text{пов}} = 673 \text{ }^{\circ}\text{K}$ ($400 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

Параметры модели: турбулентность — SST модель.

Расчетная сетка: декартова 360×180 + адаптация второго уровня в области исследуемого тела.

Расчетная сетка выбиралась по критерию $Y^+ < 40$.

Шаг расчета по времени: $3\text{E}-05$ с.

Результаты аэродинамического моделирования базовой модели токоприемника со вставками прямоугольного сечения показаны на рис. 4.

В результате проведенных расчетов показано, что, несмотря на плохо обтекаемую форму прямоугольного сечения, давление воздуха в области контактных поверхностей вставок значительно выше, чем в случае овального сечения. Вариант альтернативного полоза с закругленными вставками обтекает на рассмотренных скоростях безотрывно, что приводит к значительному снижению давления на его поверхности (рис. 5).

Однако токосъемная вставка овального сечения значительно лучше охлаждается набегающим потоком, чем вставка прямоугольного сечения.

Распределение давления по поверхности вставок при наличии контактного провода показано на рис. 6.

Наличие контактного провода вблизи исследуемой зоны контакта токосъемной вставки и провода приводит к уменьшению разряжения (в 2,5 раза) на поверхности. Это происходит благодаря наличию «аэродинамического подпора», характерного для исследуемой формы вставки.

Перспективный вариант формы поперечного сечения вставки. Накопленный опыт расчетов распределенных аэродинамических характеристик токосъемных вставок различных форм позволил сформировать усовершенствованный вариант конструкции полоза токоприемника, обладающий улучшенными характеристиками.

Основная идея предлагаемой конструкции, схема которой изображена на рис. 7, заключается в реализации эффекта «струйного закрылка», известного в аэродинамике самолетов [13]. За телом вставки с помощью спойлера, установленного на полозе, создается поток воздуха, направленный вверх, движущийся «наперерез» основному потоку обтекания сборки. При «столкновении» разнонаправленных потоков в непосредственной близости от контактной поверхности происходит повышение местного динамического давления воздуха.

При реализации такого варианта конструкции полоза возможно получение не разряжения, а, наоборот, динамического «подпора» воздуха вблизи контактной поверхности. Основной проблемой предложенного варианта можно назвать необходимость доработки каркаса стандартного полоза токоприемника.

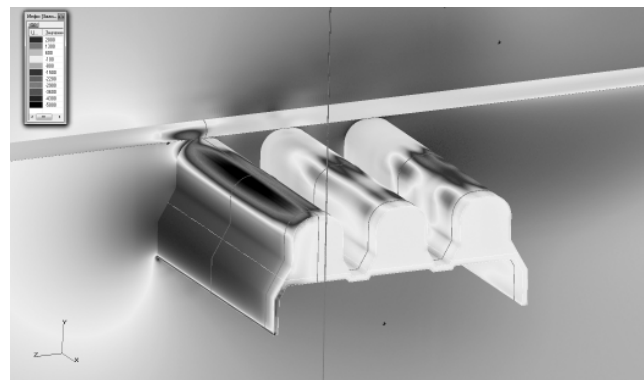


Рис. 6. Распределение давления по поверхностям токосъемных элементов, контактного провода и продольной плоскости симметрии

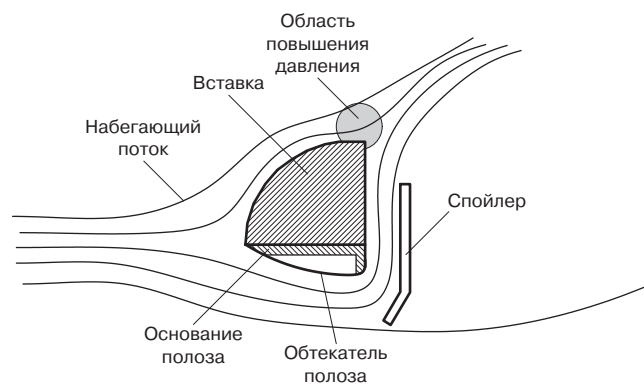


Рис. 7. Схема предлагаемой конструкции

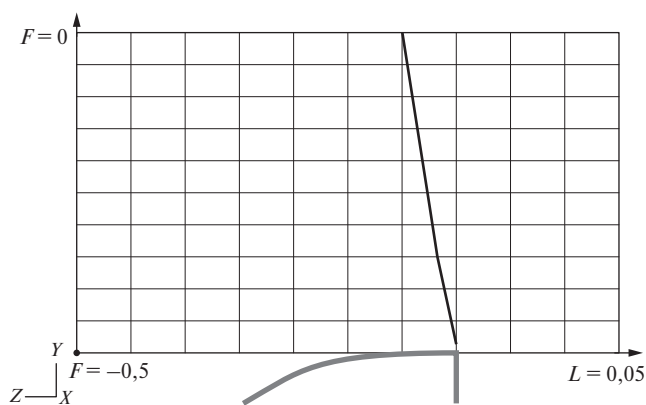


Рис. 8. Зависимость распределения коэффициента $-c_p$ по контактной поверхности первой по ходу движения вставки в центральном сечении (под контактным проводом)

Основные результаты расчета этого варианта геометрии показаны на рис. 8, 9.

Первые предварительные расчеты показали, что при реализации данной конструкции вблизи контактных поверхностей удастся получить повышенное динамическое давление.

Испытания. Эксплуатационные испытания проводились на электропоездах типа ЭД4М. Одновременно на одном составе устанавливались вставки с альтернативной (рис. 10) и стандартной формой на разных токоприемниках.

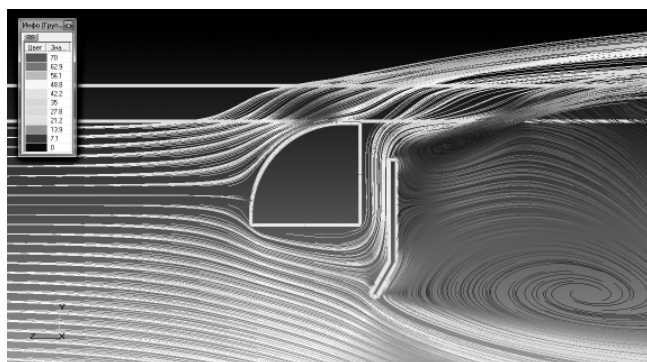


Рис. 9. Картина линий тока вокруг первой по ходу движения вставки в центральном сечении, м/с

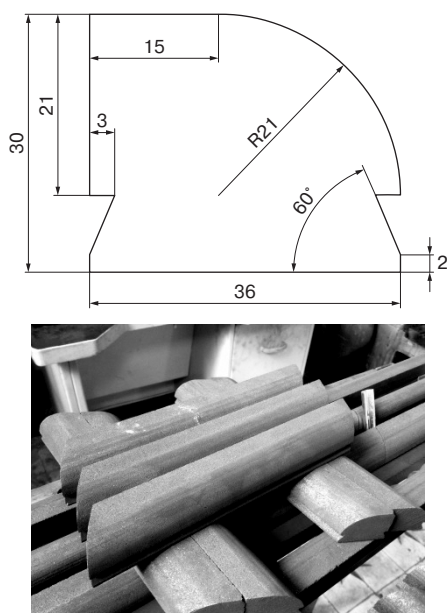


Рис. 10. Альтернативная форма токосъемных вставок

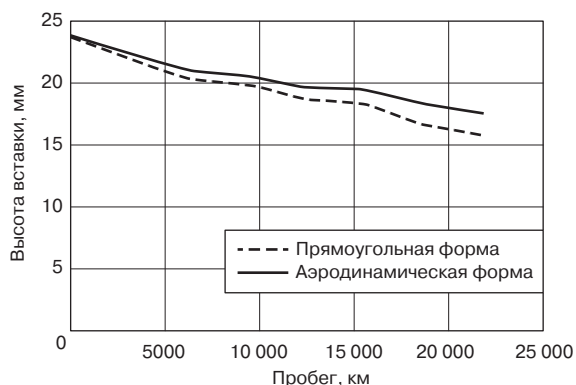


Рис. 11. Зависимость высоты вставок от пробега

В ходе проведения испытаний интенсивность изнашивания вставок с альтернативной формой примерно на 20% меньше интенсивности изнашивания вставок с прямоугольной формой. Результаты испытаний представлены на рис. 11.

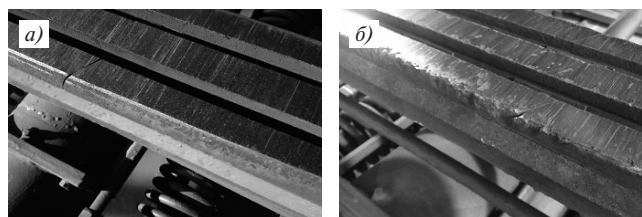


Рис. 12. Состояние вставок с альтернативной и стандартной формой после пробега 25 000 км на одном составе:

а — вставки с перспективной формой (отсутствуют сколы);
б — вставки стандартной формы (наличие большого количества сколов)

В ходе проведения эксплуатационных испытаний для вставок аэродинамической формы была обнаружена еще одна особенность, которая положительно сказывается на их ресурсе. Благодаря скругленным формам набегающей и сбегающей поверхностей вставок взаимодействие полоза токоприемника с контактной сетью, включая сопряжения анкерных участков и воздушные стрелки, происходит в гораздо более мягких режимах и практически безотрывно. В результате вероятность возникновения сколов, трещин от ударных нагрузок (рис. 12) в значительной мере снижается, что положительно сказывается как на качестве токосъема, так и на ресурсе токоприемника в целом (меньше износ механизмов подвески полоза и непосредственно токосъемных вставок).

Закключение. Интенсификация несамопроизвольных процессов приводит к снижению интенсивности изнашивания. Увеличение скорости этих процессов с помощью создания альтернативной формы вставок наиболее действенно при высоких скоростях. Благодаря скругленным формам набегающей и сбегающей поверхностей альтернативных вставок взаимодействие полоза токоприемника с контактной сетью, включая сопряжения анкерных участков и воздушные стрелки, происходит в гораздо более мягких режимах и практически безотрывно, что позволяет повысить стабильность токосъемного узла.

Работа выполнялась при поддержке гранта Российского научного фонда №15-19-00217.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aoki S. and Fukuhara K. Effect of Material Combination of Metallic Contact Strip and Contact Wire on Wear Characteristics // Quarterly Report of RTRI. 1997 (38), no. 2, pp. 82–88.
2. Kubo S., Tsuchiya H. and Ikeuchi J. Wear Properties of Metal/Carbon Composite Pantograph Sliders for Conventional Electric Vehicles // Quarterly Report of RTRI. 1997, vol. 38, no. 1, pp. 25–30.
3. Da Hai He and Rafael Manoryb A Novel Electrical Contact Material with Improved Self-Lubrication for Railway Current Collectors // Wear. 2001 (249), no. 7, pp. 626–636.
4. Kubo S., Tsuchiya H., Ikeuchi J., Nagasawa H., Kusumi S. and Sugahara A. Development of Metallized Carbon Contact Strips Applicable to Pantograph Current Collection with Higher Electric Current Density // Japanese Journal of Tribology. 2005 (50), no. 1, pp. 109–118.

5. Schleifleiste aus Kohlenstoff mit einem geringen Anteil an dunnen metallischen Leitern. Заявка 10328546 Германия SGL CARBON AG. Fischer Ludger. № 10328546.6; заявл. 24.06.2003; опубл. 27.01.2005.

6. Способ изготовления контактной вставки: пат. 2170183 / С.А. Куценко, А.Н. Трошкин. № 2000104996/28; заявл. 29.02.2000; опубл. 10.07.2001.

7. Jin Yong-ping, Guo Bin, and Zheng Ai-long. Harbin Gongyc Daxue Xuebao // Harbin Inst. Technol. 2003, no. 4, pp. 441 – 446.

8. Связь формы поверхности трения и износостойкости токо-съемных вставок / И.С. Гершман [и др.] // Трение и износ. 2012. Т. 33. № 6. С. 653 – 655.

9. Токосъем и тяговое электроснабжение при высокоскоростном движении на постоянном токе: сб. науч. трудов ОАО «ВНИИЖТ» / под ред. Н.В. Мироноса и П.Г. Тюрина. М.: Ин-текст, 2010. С. 15 – 19.

10. M. Ikeda, K. Manabe. Development of Low Noise Pantograph with Passive Lift Suppression Mechanism of Panhead. Quarterly Report of RTRI. V. 41, no. 4. 2000, pp. 177 – 181.

11. M. Ikeda, M. Suzuki, K. Yoshida. Study on Optimization of Panhead Shape Possessing Low Noise and Stable Aerodynamic Characteristics. Quarterly Report of RTRI. V. 47, no. 2. 2006, pp. 72 – 77.

12. M. Ikeda, T. Koyama. Flow Control on Pantograph with Air Intake and Outlet. Quarterly Report of RTRI. V. 48, no. 4. 2007, pp. 236 – 239.

13. Колесников Г.А. Аэродинамика летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1993. 544 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГЕРШМАН Евгений Иосифович, младший научный сотрудник лаборатории цветных металлов и трибологии, ОАО «ВНИИЖТ». 129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10. Тел.: (499) 262-34-57. E-mail: gershmanei@gmail.com

ГЕРШМАН Иосиф Сергеевич, заведующий лабораторией цветных металлов и трибологии, ОАО «ВНИИЖТ». 129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10. Тел.: (499) 262-34-57. E-mail: gershmanei@gmail.com

МИРОНОВ Александр Евгеньевич, ведущий научный сотрудник лаборатории цветных металлов и трибологии, ОАО «ВНИИЖТ». 129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10. Тел.: (499) 262-34-57.

Effect of the Shape of Carbon-Based Collection Elements on Their Wear-Resisting Properties and Current Collection Stability

Evgeniy I. Gershman, Junior Researcher, Laboratory for Non-Ferrous Metals and Tribology, JSC Railway Research Institute (JSC VNIIZhT). 10, 3rd Mytischinskaya str., 129626 Moscow, Russian Federation. Tel.: +7 (499) 262 3457. E-mail: gershmanei@gmail.com

Iosif S. Gershman, Dr. of Technical Science, Chief of Laboratory for Non-Ferrous Metals and Tribology, JSC Railway Research Institute (JSC VNIIZhT). 10, 3rd Mytischinskaya str., 129626 Moscow, Russian Federation. Tel.: +7 (499) 262 3457. E-mail: gershmanei@gmail.com

Alexander E. Mironov, Candidate of Technical Science, Leading Researcher, Laboratory for Non-Ferrous Metals and Tribology, JSC Railway Research Institute (JSC VNIIZhT). 10, 3rd Mytischinskaya str., 129626 Moscow, Russian Federation. Tel.: +7 (499) 262 3457.

Abstract. The aspect under discussion is alternate shape of current collection elements. Modification of their traditional shape is tackled from the viewpoint of achieving better wear resistance and reliability of the current-collector unit's sliding contact strips. There is indicated influence exerted by the shape of the collection elements on the aerodynamic and tribological performance. Based on the obtained data there was developed alternate collection element shape version contributing to lesser wear intensity and better stability of the collector unit. There is also indicated that aerodynamics-friendly shape of current collection elements contributes to their lesser damageability and more intensive cooling. The approach to the problem under discussion taken by the authors bases upon non-equilibrium thermodynamics and self-organization theory.

Keywords: friction; wear-resisting properties; contact strips; aerodynamic shape; thermodynamic and kinetic factors

References

1. Aoki S., Fukuhara K. *Effect of Material Combination of Metallic Contact Strip and Contact Wire on Wear Characteristics*. Quarterly Report of RTRI, 1997, vol. 38, no. 2, pp. 82 – 88.
2. Kubo S., Tsuchiya H., Ikeuchi J. *Wear Properties of Metal/Carbon Composite Pantograph Sliders for Conventional Electric Vehicles*. Quarterly Report of RTRI, 1997, vol. 38, no. 1, pp. 25 – 30.
3. Da Hai He and Rafael Manoryb A Novel Electrical Contact Material with Im-proved Self-Lubrication for Railway Current Collectors. *Wear*, 2001, vol. 249, no. 7, pp. 626 – 636.
4. Kubo S., Tsuchiya H., Ikeuchi J., Nagasawa H., Kusumi S., Sugahara A. *Development of Metallized Carbon Contact Strips Applicable to Pantograph Current Collection with Higher Electric Current Density*. Japanese Journal of Tribology, 2005, vol. 50, no. 1, pp. 109 – 118.

5. *Schleifleiste aus Kohlenstoff mit einem geringen Anteil an dunnen metallischen Leitern* [Wearing strip made of carbon with a small amount of thin metallic conductors]. Appl. 10328546. Germany SGL CARBON AG. Fischer Ludger № 10328546.6; Announced 24.06.2003, Publ. 27.01.2005

6. Kutsenko S.A., Troshkin A.N. *A method of manufacturing a contact insert*. Patent. 2170183 № 2000104996/28. Appl. 29.02.2000. Publ. 10.07.2001

7. Jin Yong-ping, Guo Bin, Zheng Ai-long. *Harbin Gongyc Daxue Xuebao*. Harbin Institute of Technology, 2003, no. 4, pp. 441 – 446.

8. Gershman I.S., Krivoguz A.S., Gershman E.I., Bol'shakov Yu.L. *Svyaz' formy poverkhnosti treniya i iznosostoykosti tokos'emnykh vstavok* [Contact of forms of the friction surface and wear resistance current collector inserts]. *Trenie i iznos*, 2012, vol. 33, no. 6, pp. 653 – 655.

9. *Tokos'em i tyagovoe elektrosnabzhenie pri vysokoskorostnom dvizhenii na postoyannom toke*. Sb. nach. tr. ОАО "ВНИИЖТ" [Current collection and traction power supply for high-speed motion at a constant current. Coll. of sci. works of JSC «ВНИИЖТ» (Railway Research Institute)]. Moscow, Intext Publ., 2010, pp. 15 – 19.

10. Ikeda M., Manabe K. *Development of Low Noise Pantograph with Passive Lift Suppression Mechanism of Panhead*. Quarterly Report of RTRI, 2000, vol. 41, no. 4, pp. 177 – 181.

11. Ikeda M., Suzuki M., Yoshida K. *Study on Optimization of Panhead Shape Possessing Low Noise and Stable Aerodynamic Characteristics*. Quarterly Report of RTRI, 2006, vol. 47, no. 2, pp. 72 – 77.

12. Ikeda M., Koyama T. *Flow Control on Pantograph with Air Intake and Outlet*. Quarterly Report of RTRI, 2007, vol. 48, no. 4, pp. 236 – 239.

13. Kolesnikov G. A. *Aerodinamika letatel'nykh apparatov* [Aerodynamics of aircraft]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993. 544 p.