

4. Шилов, М.А. Исследование износостойкости наноструктурированных эластомеров, используемых в пневматических шинах в качестве протекторов / М.А. Шилов, Л.Б. Маслов, П.В. Королев // Жидкие кристаллы и их практическое использование, 2018. – Т. 18. № 1. – С. 73-78.

5. Гент, А. Пневматическая шина [Пер. с англ.] / А. Гент, Дж. Уолтер – М. : НТЦ «НИИШП», 2015. – 746 с.

6. Горячева, И.Г., Трение эластомеров. Моделирование и эксперимент / И.Г. Горячева, Ю.Ю. Маховская, А.В. Морозов, Ф.И. Степанов. — М.– Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2017. — 204 с.

P.V. Korolev¹, M.A. Shilov¹

¹Ivanovo State Energy University, Ivanovo, Ivanovo region, Russia, vedunking@mail.ru

FRICION CHARACTERISTICS OF ELASTOMER SAMPLES BASED ON SKI-3 AND SKS-30-ARKM-15

Annotation

This paper presents the results of friction and wear tests of elastomers based on SKI-3 and SKS-30-ARKM-15 rubbers and their modifications in a wide range of speeds, specific loads and temperatures. The results of bench tests are presented and the results obtained are analyzed. Dependencies of wear intensity depending on a number of parameters were obtained.

Keywords: friction characteristics, wear rate, friction, elastomer, composite.

УДК 621.3

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-235

А.П. Ващишина, С.П. Ващишин

Брянский государственный технический университет (БГТУ)

¹vashhi.anya@yandex.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ НА ОСНОВЕ СВОЙСТВ ПЛАСТИЧНОГО СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА И УСЛОВИЙ КОНТАКТИРОВАНИЯ ПАРЫ ТРЕНИЯ ГРЕБЕНЬ-РЕЛЬС

Аннотация

Проведены экспериментальные исследования на определение антифрикционных свойств пластичного смазочного материала. Определены такие важные характеристики, как вязкость и коэффициент трения. В работе установлены факторы, влияющие на скорость изнашивания гребня колеса локомотива. Предложена математическая модель скорости изнашивания гребня колеса-рельс, позволяющая оценить эксплуатационные свойства исследуемой пары трения. Проведен сравнительный анализ математической модели и экспериментальных исследований. Установлено, что использование приведенной модели позволяет оценить процесс скорости изнашивания.

Ключевые слова: Трение, смазочный материал, присадки, скорость изнашивания.

Введение

Присадки и модификаторы трения играют важную роль в повышении эффективности смазочных материалов. Актуальным является использование смазочных материалов для поддержания эффективной смазывающей способности внутренних компонентов в диапазоне температур и условий эксплуатации. Основное назначение смазочного материала — поглощать тепло и уменьшать трение между неровностями поверхности. Правильный выбор компонентов определяет его эффективность в заданных условиях эксплуатации, а подбор присадок позволяет использовать их в требуемых условиях в зависимости от функций смазочных материалов: уменьшение коэффициента трения, адгезионная способность к поверхности гребня.

Граничная пленка снижает трение и износ материала пары трения за счет заполнения неровностей поверхности слоем твердой антифрикционной добавки. Вязкостные свойства смазочного материала отвечают за его несущую способность. Пластичные смазочные материалы используются на железнодорожном транспорте для обеспечения смазывания пары трения гребень колеса-рельс. В работах [1-3], авторами были рассмотрены свойства смазочного материала и свойства материала образцов, с целью определения их влияния на процесс изнашивания гребня колеса локомотива. В работе основной целью исследования является определение антифрикционных свойств пластичного смазочного материала, а также определение условий контактирования поверхностей трения и прогнозирование времени до наступления износа.

Методы

Вязкостные характеристики смазочного материала с исследуемыми присадками определялись на приборе Vibro Viscometer SV-100. Трибологические характеристики смазочных материалов определялись на маслоиспытательной машине КТ-2. В качестве присадок выбирали соединения, относительно их класса, агрессивности и способностью к смачиваемости поверхности.

Результаты и обсуждение

Ранее были проведены испытания на износ, которые показали, что использование присадки гидрохинона уменьшает изнашивание поверхности пары трения гребень колеса-рельс [1]. Результаты исследований динамической вязкости показаны на рис.1.

Как видно из рис.1, при нагревании смазочного материала Пума значение вязкости резко уменьшается для присадок фосфорорганического соединения и гидрохинона, присадка сульфосоединения изначально показывает завышенные значения. Адсорбционная активность и вязкость молекулы при уменьшении температуры увеличиваются. Можно отметить, что использование сульфоприсадки явно показывает завышенные значения динамической вязкости, что говорит о высоком коэффициенте внутреннего трения и материал становится более плотным.

Введение присадок сульфосоединения показывает значение коэффициента трения 0,217 при 260 °С, присадка фосфорорганического соединения 0,160, чистый смазочный материал Пума 0,171, с добавлением присадки гидрохинона коэффициент трения составляет 0,102 (рис.2).

По данным рис.1 и рис.2 были получены значения зависимости коэффициента трения от вязкости смазочного материала. На рис.3 представлена зависимость

коэффициента трения от вязкости смазочного материала. Данные были выбраны с диапазоном температур 25-70 °С.

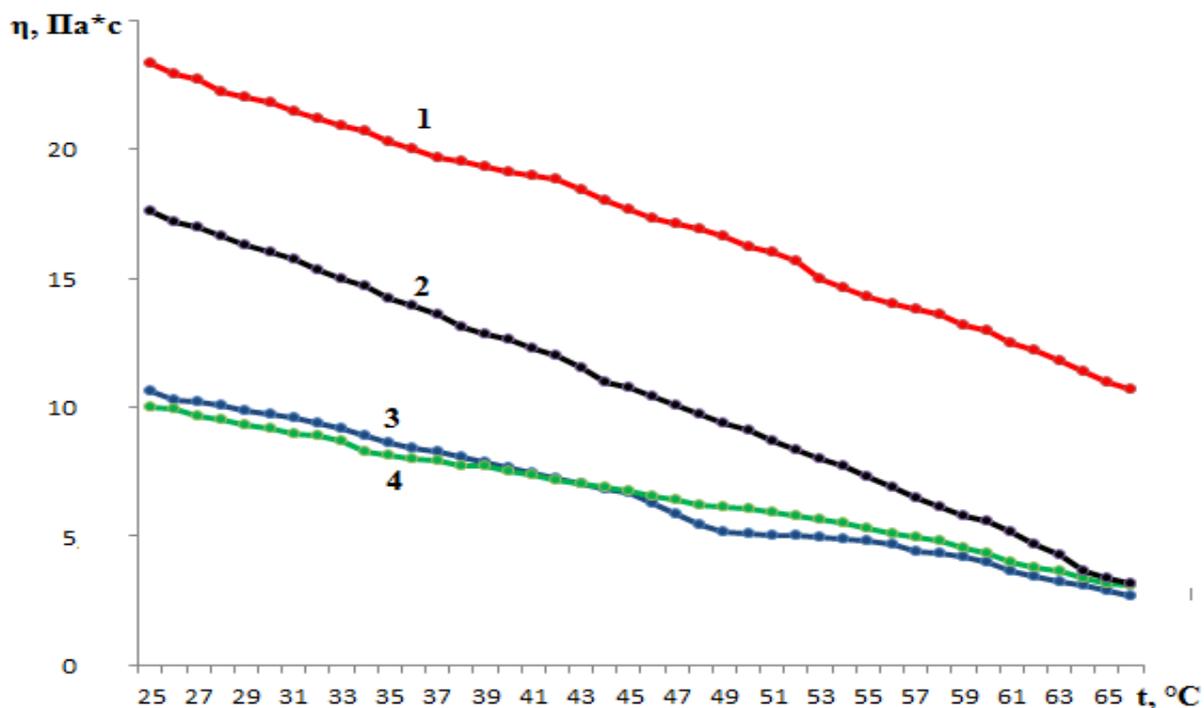


Рисунок 1 – Изменение динамической вязкости смазочного материала с присадками от температуры: 1-сульфоорганическая; 2-фосфорорганическая; 3-гидро; 4-смазочный материал Пума

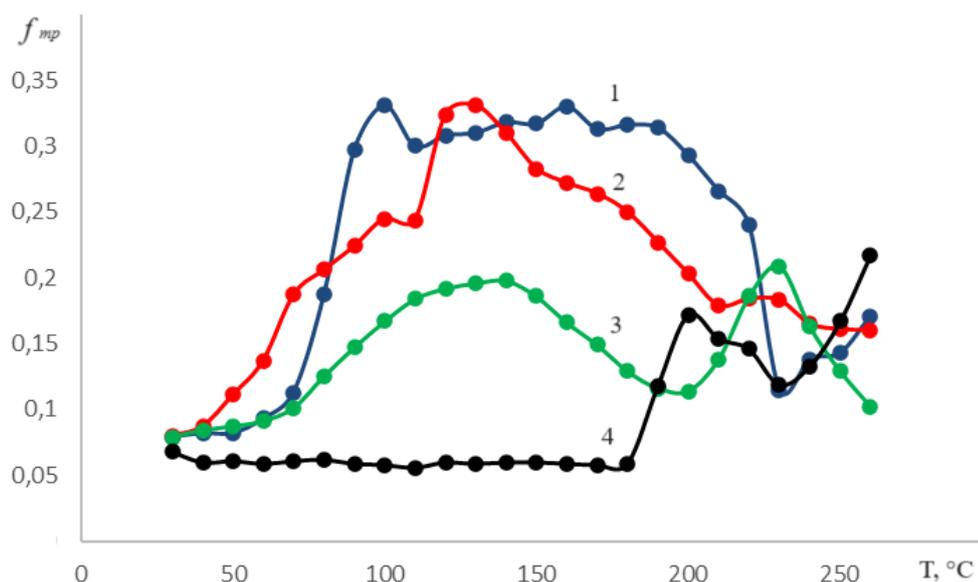


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента трения от температуры проводимых испытаний: 1-без присадки; 2-фосфорорганическая присадка; 3-гидрохинон; 4-сульфосоединение

Как видно из полученных данных, можно сделать вывод, что с увеличением вязкости смазочного материала с присадкой коэффициент трения уменьшается для присадки производного гидрохинона и фосфорорганического соединения.

У всех смазочных материалов наблюдается выделение масла при хранении, что говорит о низкой коллоидной стабильности. Низкая коллоидная стабильность свидетельствует о том, что в составе смазочного материала находится низкая

массовая доля органического загустителя, добавляемого в процессе изготовления. Смазочный материал начинает заметно плавиться примерно при 190-200 °С, примерно при 220 °С смазки плавятся полностью и переходят в жидкое состояние. Однако, данный фактор незначителен для процесса смазывания гребня колеса локомотива.

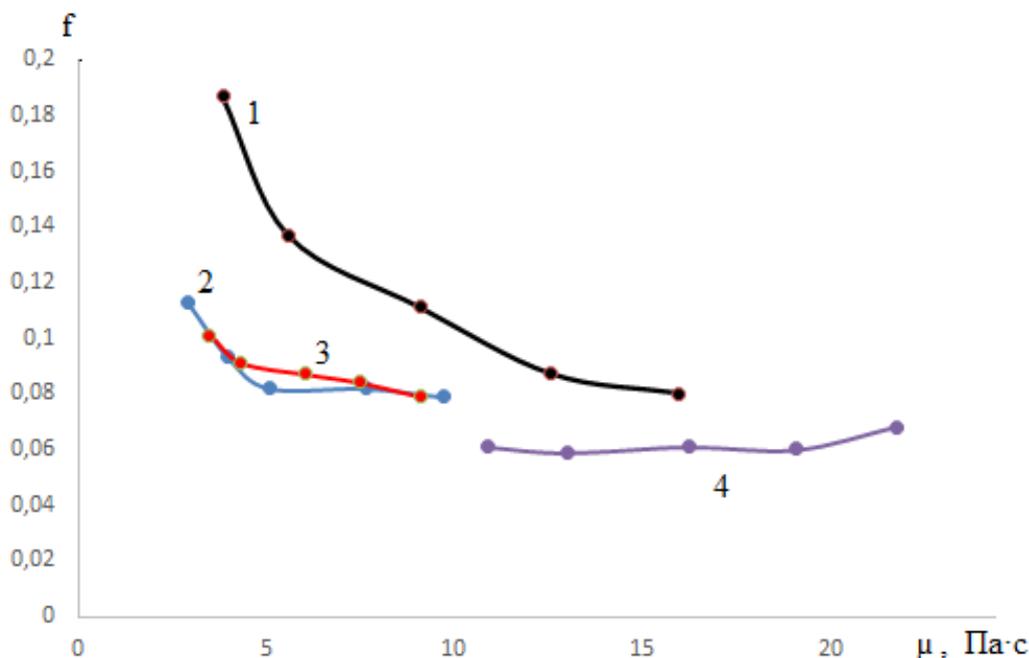


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента трения от вязкости смазочного материала: 1) фосфорорганическое соединение; 2) Пума; 3) присадка гидрохинона; 4) сульфоприсадка

Актуальным является исследование взаимодействия гребня колеса и рельса, как системы двух тел при наличии слоя смазочного материала.

Предположим, что при входе локомотива в криволинейный участок железнодорожного пути наиболее опасное давление возникает при контакте колесной пары с внешним рельсом, так как центробежные силы на внешнем рельсе максимальны. В первом приближении давление гребня на рельс можно определить

$$P_r = \frac{F}{S}, \quad (1)$$

где F -сила воздействия на рельс, S -площадь пятна контакта.

Моделирование скорости изнашивания можно осуществить на основе теории подобия [2]. Наличие трех тел в зоне контакта при рассмотрении факторов, оказывающих влияние на скорость изнашивания, позволил получить критериальное уравнение: $v_1=f(\pi_i)$ при $i=s$.

К определяющим факторам отнесем P -давление гребня на рельс (максимальное) в криволинейном участке пути; K_c – ударная вязкость более мягкого материала (бандажа); характеристики смазочного материала: η динамическая вязкость, τ -напряжение сдвига в пластичном смазочном материале; условия протекания процесса изнашивания: L -путь трения, V - объем, отделяемый в процессе изнашивания, v -скорость изнашивания.

Для определения числа независимых решений воспользуемся π -теоремой Бакингема [2]. С учетом того, что критерии подобия являются величинами нулевой размерности, то решение имеет вид

$$\begin{cases} -z_1 - z_2 + 3z_3 + z_4 - z_5 + z_6 = 0 \\ z_1 + z_2 + z_5 + z_6 = 0 \\ -2z_1 - 2z_2 - z_5 - 2z_6 - z_7 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Здесь $z_1 \dots z_n$ показатели степени.

Система уравнений (2) имеет единственное решение если определитель матрицы не равен нулю.

Найдем критерий π_1 :

$$\pi_1 = \frac{P\tau V}{L\eta K_c v} \quad (3)$$

Проведя анализ выражения (3) нетрудно заметить, что отношение объема изнашенного материала V на путь трения L представляет собой объемную интенсивность изнашивания $I_v = \frac{V}{L}$. Отношение давления к ударной вязкости K_c характеризует способность материала разрушаться при ударных нагрузках. Направление сдвига τ отнесенное к произведению вязкости и скорости скольжения определяет несущую способность смазывающего материала.

Учитывая нулевую размерность критериев подобия можно записать

$$\pi_1(v) = 1$$

$$\frac{P\tau V}{L\eta kv} = 1, \text{ откуда с учетом критериев } \pi_2, \pi_3, \pi_4$$

$$v = \frac{P\tau V}{L\eta K_c} f(\pi_2)f(\pi_3)f(\pi_4)$$

Очевидно, что в рассматриваемой системе гребень-рельс критерий π_2 должен характеризовать процесс трения, тогда $f(\pi_2)=f_{mp}$.

Немаловажную роль играет механизм процесса изнашивания, на который, как широко признается [4-10], существенное воздействие оказывает водород и водородное изнашивание. Тогда критерий π_3 можно записать, как характеристику активности водорода в зоне трения

$$f(\pi_3)=I_{H_2},$$

где I_{H_2} – интенсивность выделения диффузионно-активного водорода в зоне трения.

Критерий π_4 характеризует отклик системы и может быть определен эмпирически. Тогда скорость изнашивания гребня бандажа

$$v = f_{тр} \frac{P\tau V}{L\eta K_c} I_{H_2} f(\pi_4) \quad (4)$$

Проведем расчет по выражению (4) для условий проведенных испытаний. Максимальное время испытаний составило 10 мин=600с на пути трения $L=94,2$ м. Давление в зоне контакта определим по выражению (1).

Площадь контакта S определим из теории Герца для пары цилиндр-плоскость [2]

$$S = 1,52 \cdot \frac{P}{E} \sqrt{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}},$$

где P -нагрузка при испытаниях на машине трения, E - модуль упругости, R_1, R_2 -радиусы поверхностей трения образца и контртела. Откуда $S=284 \cdot 10^{-5}$ мм. Таким образом, давление в зоне контакта $P=70,32/284 \cdot 10^{-8} \cdot 55 \cdot 10^{-3} = 4,502 \cdot 10^8$ Па.

Интенсивность выделения диффузионно-активного водорода в процессе испытаний на пути трения L определялась по выражению

$$I_{H_2} = \frac{dH_2}{dL} \quad (5)$$

При этом параметр I_{H_2} принимается безразмерным. Здесь dH_2 – увеличение в концентрации выделившихся газов водорода ppm. Объем изношенного материала определим как фактор свойств материала. Тогда

$$V = \frac{dm}{\rho},$$

где dm - изменение массы частиц износа, ρ – плотность материала г/см³.

Плотность бандажной стали $\rho=7850\text{кг/м}^3$ по ГОСТ 380-2005, масса частиц износа dm примем 27 мг, тогда объем изношенного материала $V=1,4 \cdot 10^{-6}$. Ударная вязкость бандажа определяется по ГОСТ 398-96 и равна $K_c=0,2$ Дж/см², вязкость смазочного материала Пума $\eta=10\text{Па}$, коэффициент трения при температуре $t=50^\circ\text{C}$ равен $f_{тр}=0,08$, напряжение сдвига $\tau=330 \cdot 10^6$ Па [1-3].

Подставив значения в выражение (4) получим

$$v=3,02 \cdot 10^{-7} f(\pi_4).$$

Экспериментальные исследования позволили получить следующее значение скорости изнашивания $v_{эксн}=3 \cdot 10^{-7}$ м/с. Анализируя результаты теоретических расчетов и экспериментальных исследований очевидным является, что критерий $\pi_4=10^{-9}$.

$$v = f_{тр} \frac{P\tau V}{L\eta K_C} I_{H_2} \cdot 10^{-9} \quad (6)$$

В процессе эксперимента установлено, что объем выделившегося водорода составил 67 ppm, тогда по выражению (5) $I_{H_2}=67/94,2=0,711$.

На основании модели (6) имеется возможность прогнозировать износ материала, так

$$v = \frac{dh}{dt},$$

где dh – износ материала, dt -время испытаний.

Тогда

$$dh = dt \cdot v \quad (7)$$

Для смазочного материала Пума износ за 600с испытаний составил 180 мкм, расчет по выражению (7) с учетом выражения (6) равен $dh=3,02 \cdot 10^{-7} \cdot 600=181,2$ мкм. Таким образом, погрешность составляет 0,67 %.

Заключение

В результате экспериментальных исследований установлено, что с добавлением присадок в смазочный материал уменьшается коэффициент трения с использованием присадки гидрохинона и его значение составляет 0,102. Коэффициент трения смазочного материала с присадками уменьшается с увеличением вязкости, что связано с наличием на поверхности трения граничной защитной пленки, образованной за счет хемосорбционных процессов между смазочным материалом и поверхностью металла. Разработана математическая модель скорости изнашивания пары трения гребня колеса и рельса, позволяющая оценить долговечность эксплуатации гребня локомотива. На основе разработанной математической модели установлено, что основными факторами, влияющими на износ пары трения является диффузионно-активный водород, вязкость смазочного материала с использованными присадками. Полученная математическая модель позволяет прогнозировать износ материала гребня бандажа с точностью прогнозирования 0,67%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шалыгин М.Г., Буяновский И.А., Самусенко В.Д., Ващишина А.П. Фрикционные свойства присадок к смазочному материалу гребня бандажа локомотива // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2023. – № 1. – С. 37-39.
2. Шалыгин М.Г., Ващишина А.П. Математическое моделирование скорости изнашивания пары трения колесо локомотива-рельс // Трение и износ. – 2023. – Т. 44. – № 1. – С. 34-40.
3. Шалыгин М.Г., Буяновский И.А., Самусенко В.Д., Ващишина А.П. Трибологические свойства полужидкого смазочного материала с присадками поверхностно-активных веществ // Трение и износ. – 2023. – Т. 44. – № 5. – С. 418-426.
4. Лукашев Е. А., Сидоров М. И., Юрцев Е. С. Анализ связи процессов водородного изнашивания и образования гидридов // Современные материалы, техника и технологии. – 2017. – №2 (10).
5. Трибохимия водородного износа: монография / Е. А. Лукашев, М. Е. Ставровский, А. В. Олейник, В. М. Юдин, С. Г. Емельянов. - Курск : Курск ГТУ. – 2007. - 279 с.
6. Касаткин, Г.Н. Водород в конструкционных сталях. / Г.Н. Касаткин - М: Интермет Инжиниринг. –2003. - 336 с:
7. Ставровский, М.Е. Технологические методы защиты деталей узлов машин от водородного изнашивания / М.Е. Ставровский, А.В. Олейник, С.Г. Емельянов // Технология машиностроения. — 2009. — № 9. — С. 39-41. 203.
8. Ставровский, М.Е. Исследование эксплуатационного наводораживания материалов деталей / М.Е. Ставровский, М.И. Сидоров, С.Г. Емельянов, С.Г. Посеренин // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2016. – №2. – С. 59-65. 204.
9. Ставровский, М.Е. Исследование технологических мероприятий по снижению наводораживания материалов / М.Е. Ставровский, М.И. Сидоров, С.Г. Емельянов, С.П. Посеренин, И.М. Константинов // Известия юго-западного государственного университета. Серия: техника и технологии. — 2016. — №2. — С. 20-25. 205.
10. Ставровский, М.Е. Моделирование адгезии при контактном взаимодействии металлов / М.Е. Ставровский, А.Ю. Албагачиев, М.И. Сидоров // Современные материалы, техника и технологии. — 2016. — № 7. — С. 168-173.

¹Vashchishina A.P., ²Vashchishina S.P.

^{1,2} Bryansk State Technical University (BSTU)

e-mail: vashhi.anya@yandex.ru

MODELING OF WEAR RATE BASED ON THE PROPERTIES OF THE LUBRICANT AND CONTACT CONDITIONS OF THE FRICTION PAIR-ROAD

Abstract

Experimental studies were carried out to determine the antifriction properties of the plastic lubricant. Important characteristics such as viscosity and friction coefficient have been determined. The work identified factors influencing the wear rate of the locomotive wheel flange. A mathematical model of the wear rate of the wheel-rail flange is proposed, which makes it possible to evaluate the operational properties of the friction pair under study. A comparative analysis of the mathematical model and experimental studies was carried out. It has been established that the use of the above model makes it possible to evaluate the wear rate process.

Keywords: friction, lubricant, additives, wear rate.