

УДК 625.1+621.893+621

Применение смазки для системы «колесо – рельс». Решение проблемы износа с использованием отходов производства

Б. Тувшинтур^a, Д.И. Винокуров^b, Г.А. Якимова^c, В.Е. Гозбенко^d

Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского 15, Иркутск, Россия

^abongo_tuvshin@yahoo.com, ^bpr-mech@mail.ru, ^cchem2007@mail.ru, ^dvgozbenko@yandex.ru

Статья поступила 15.07.2015, принята 6.09.2015

Анализ проблемы износа боковых граней рельсов в кривых участках пути и гребней колес подвижного состава показывает, что увеличение износа связано с заменой локомотивной тяги, увеличением нормативного веса поездов и т. д. Во многих случаях износ рельсов и колес в 3...6 раз превышает предусмотренную норму. В начале 1980-х гг. срок службы бандажей колесных пар локомотивов составлял 6...7 лет, в 1990-е гг. он сократился до 2...3 лет. Из-за бокового износа выход рельсов из строя за последние 10 лет увеличился более чем в 3 раза. Анализ современных методов и приемов снижения износа с использованием лубрикации показал, что более простым, эффективным и менее затратным способом является применение смазочных композиций, разработанных на основе отходов местного химического и целлюлозно-бумажного производства. Предлагается композиция для предотвращения износа в паре трения «колесо – рельс», которая состоит из дешевых доступных компонентов, легко наносится на рельс, обладает высокой эффективностью и оказывает минимальное экологическое воздействие на человека и окружающую среду. Полученные аппроксимирующие зависимости позволяют достаточно точно прогнозировать износ в паре трения «колесо – рельс» в зависимости от состава смазочной композиции. Предложено решение задачи снижения износа в паре «колесо – рельс» путем применения новых смазочных композиций на основе низкомолекулярного полиэтилена и природного полимера лигнина применительно к условиям Восточно-Сибирской железной дороги ОАО «РЖД». Создана новая смазочная композиция на основе низкомолекулярного полиэтилена для процесса лубрикации пары «колесо – рельс», что позволило снизить затраты на лубрикацию и частично решить проблему утилизации отходов химического производства (лигнина, нефтяного кокса, низкомолекулярного полиэтилена). Испытания свойств разработанных смазочных композиций применительно к условиям взаимодействия колес подвижного состава с рельсом проведены в лабораторных условиях с использованием машины трения III 5018.

Ключевые слова: износ; ресурсосберегающая технология; моделирование; математическая модель; уравнение регрессии; техническое состояние; лубрикация.

Lubricants for the wheel-rail system. Solution of an excessive wear problem with production wastes used

B. Tuvshintu^a, D.I. Vinokurov^b, G.A. Yakimova^c, V.E. Gozbenko^d

Irkutsk State Transport University; 15, Chernishevsky St., Irkutsk, Russia

^abongo_tuvshin@yahoo.com, ^bpr-mech@mail.ru, ^cchem2007@mail.ru, ^dvgozbenko@yandex.ru

Received 15.07.2015, accepted 6.09.2015

Analysis of the an excessive wear problem for the side edges of the rails in the curved track sections and wheel flanges of the rolling stock shows that the increase of excessive wear is connected with locomotive tie-rod replacement and the increase in standard weight of trains, etc. In many cases excessive wear of rails and wheels in 3 ... 6 times exceeds the standard. At the beginning of 1980s, the service life of bandaged for wheel pairs of locomotives was 6 ... 7 years, in 1990s it was reduced up to 2 ... 3 years. Because of excessive wear of the side rails the functional loss of rails has increased more than 3 times for the past 10 years. The analysis of modern methods and receptions for reducing excessive wear with lubricant has shown that effective and economic way is an application of lubricant compositions developed on the basis of wastes of local chemical and pulp-and-paper manufactures. To prevent the excessive wear in the wheel-rail system, a composition has been proposed which consists of low-cost, accessible components, is easy to be put on a rail, possesses high efficiency and has the minimum pollution effect on people and the environment. The approximating dependences gained allow predicting precisely the excessive wear in the wheel-rail system depending on the lubricant composition. The solution has been offered for the problem of reducing excessive wear in the wheel-rail system by applying new lubricant compositions on the basis of low-molecular polyethylene and natural polymer of lignin, with reference to the conditions of East-Siberian Railway, (JSC «Russian Railway». A new lubricant composition has been developed on the basis of low-molecular polyethylene for the lubricant process in the wheel-rail system that has allowed decreasing lubricant expenses and solving partially a problem of salvaging of a waste of chemical manufacturing (lignin, a petroleum coke, low-molecular polyethylene). Tests of properties of the lubricant compositions developed have been conducted under laboratory conditions with the friction car III 5018 used and with reference to conditions of interaction between the wheels of a rolling stock and a rail.

Key words: deterioration; resource storage technology; modeling; mathematical model; regression equation; technical state; lubrication.

Введение. Разработка ресурсосберегающих технологий является актуальной задачей для любой отрасли, включая и железнодорожный транспорт, для которого одним из важнейших вопросов является снижение износа боковых граней рельсов в кривых участках пути и гребней колес подвижного состава. Анализ данной проблемы показывает, что увеличение износа связано с заменой локомотивной тяги, увеличением нормативного веса поездов и т. д. [1; 2]. Во многих случаях износ рельсов и колес в 3...6 раз превышает предусмотренную норму [2]. В начале 1980-х гг. срок службы бандажей колесных пар локомотивов составлял 6...7 лет, в 1990-е гг. он сократился до 2...3 лет. Из-за бокового износа выход рельсов из строя за последние 10 лет увеличился более чем в 3 раза.

Износ в зоне контакта «боковая поверхность рельса – гребень колеса» является сложным процессом [3–8], который определяется не только чисто механическими взаимодействиями и зависит от большого числа факторов, включающих климатические условия, особенности рельефа, формы соприкасающихся поверхностей, скорость движения, вес поезда и многие другие.

Одним из эффективных путей снижения износа в паре «колесо – рельс» является увеличение степеней свободы тележки по отношению к кузовной части подвижного состава [7–12], чего можно достигнуть путем модернизации люлечного подвеса кузова экипажа. Однако реализация данного направления сопряжена с большими капитальными вложениями, в связи с чем использование смазки на данный момент является приоритетным направлением, несмотря на ее несколько меньшую эффективность по сравнению с увеличением степеней свободы тележки.

Огромное количество смазочных материалов, которые используются для этих целей, характеризуется большим разнообразием как в России, так и за границей. Это обусловлено тем, что к смазкам, наносимым в зону трения «колесо – рельс», предъявляется широкий набор требований, важнейшими из которых являются: высокая эффективность смазывания; простота нанесения в зону трения; способность удерживаться на боковой поверхности рельса долгое время; доступность и низкая стоимость; пожаробезопасность; минимальное воздействие на окружающую среду и человека; устойчивость при хранении и транспортировке в заданных эксплуатационных условиях и др. Смазочные композиции, которые применяются в настоящее время на сети дорог нашей страны и за рубежом, не могут удовлетворять всему комплексу требований одновременно. Многие из них, несмотря на высокую эффективность, довольно затратны по себестоимости, имеют сложный химический состав, пожаронебезопасны, вызывают коррозию металлических частей, расположенных рядом со смазываемой поверхностью, оказывают отрицательное влияние на окружающую среду и т. д. Поэтому разработка смазочных композиций, отвечающих указанным выше высоким требованиям, является одной из актуальных задач предупреждения износа в паре «колесо – рельс». Данный факт подтверждает огромное количество публикаций и патентов на изобретения по данной проблеме, что, в свою очередь, говорит о большом, неиссякаемом интересе исследователей и практиков.

Экспериментальные исследования и испытания в российской и мировой практике показывают, что нанесение смазки на рельсы позволяет продлить срок их службы, понизить расход энергии и затрат на тягу поездов и снизить шум, а, следовательно, значительно снизить затраты на содержание вагонного и путевого хозяйства.

Анализ современных методов и приемов снижения износа с использованием лубрикации показал, что более простым, эффективным и менее затратным способом является применение смазочных композиций, разработанных на основе отходов местного химического и целлюлозно-бумажного производства [13–16].

На полигоне ВСЖД в качестве смазки широко применяют отработку дизельного масла как в чистом виде, так и с добавлением графитового порошка вместо смазок РС-6, РП-1. Несмотря на высокие антифрикционные свойства отработанного дизельного масла, смазка оказалась неэффективной, что обусловлено быстрым стеканием смазки с рельса из-за низкой вязкости и слабых адгезионных свойств. Кроме того, мелкодробленый графит в масле не сохраняет свои свойства ввиду быстрого оседания графита, что затрудняет нанесение однородного состава смазочной композиции на рельсы.

Разработка смазочных композиций на основе использования низкомолекулярного полиэтилена.

Низкомолекулярный полиэтилен (НМПЭ) — отход производства полиэтилена высокого давления. В качестве жидкого компонента, придающего смазочной композиции необходимую консистенцию, обычно используют продукты переработки нефти, например минеральное масло (в том числе отработку дизельного масла).

Важным этапом определения эффективности смазочной композиции является математическое моделирование динамических свойств взаимодействия в системе «колесо – рельс» [17–19].

Смазочная композиция, удовлетворяющая требованиям, предъявляемым к смазкам, разработана на основе НМПЭ, и в качестве антифрикционной компоненты использован отход переработки древесины на гидролизных предприятиях – лигнин, а также лигнин, частично модифицированный хлором или гипохлоритом.

С использованием лигнина предлагается смазочная композиция следующего состава (% масс.):

- а) гидролизный лигнин — 15–25;
- б) отработанное дизельное масло — 10–25;
- в) НМПЭ — остальное (до 100).

Перемешанные в необходимом соотношении компоненты композиции образуют устойчивую дисперсную систему, которая представляет собой консистентную смазку темно-коричневого цвета.

Испытания свойств разработанной смазочной композиции применительно к условиям взаимодействия колес подвижного состава с рельсом проведены в лабораторных условиях с использованием машины трения ИИ 5018. Машина трения предназначена для испытания на износ металлов и определения их антифрикционных свойств при различных видах трения.

Результаты испытаний представлены в табл. 1. Как видно из данных, уменьшение содержания лигнина ниже 15 (% масс.) снижает защитный эффект смазки, а увеличение его содержания выше 25 (% масс.) приводит к образованию густой смазки, которую трудно наносить в зону контакта.

Соотношение между содержанием дизельного масла и НМПЭ определяет консистенцию смазки и зависит от климатических условий применения композиции. Уменьшение количества дизельного масла до 10 (% масс.) и ниже делает смазку густой, ее компоненты трудно перемешиваются между собой, а его увеличение выше 25 (% масс.) приводит к образованию жидкой композиции, которая, тем не менее, обладает высокой вязкостью и плохо наносится в зону трения.

Кроме лигнина в качестве компонента композиций был использован продукт, получаемый путем введения хлора в лигнин. Для этого гидролизный лигнин в вод-

ной суспензии обрабатывают хлором или гипохлоритом. Полученный лигнин содержит 3–5 (% масс.) хлора в виде хлорорганических соединений, которые, как известно [20], используются в качестве противоизносных присадок к маслам. Композиции 9 и 10 (табл. 1) вместо лигнина содержат хлорлигнин, который способствует более долговременному действию применяемой смазки.

В табл. 1 приведены значения относительного уменьшения износа Δ за счет смазки, которое рассчитывалось по формуле:

$$\Delta = \left(\frac{I_{\text{бс}} - I}{I_{\text{бс}}} \right) * 100\% ,$$

где $I_{\text{бс}}$, I — значение износа без смазки и со смазкой.

Таблица 1

Износ опытных роликов

№ смазки	Состав смазочной композиции, %			Износ I , ϵ		Δ , %	
	Дизельное масло, x	НМПЭ, y	Лигнин, z	Подвижный ролик (ПР)	Неподвижный ролик (НР)	ПР	НР
1	15	65	20	0,054	0,145	96,597	90,954
2	15	70	15	0,098	0,198	93,824	87,648
3	15	75	10	0,153	0,203	90,359	87,336
4	20	55	25	0,126	0,136	92,060	91,515
5	25	55	20	0,085	0,097	94,644	93,948
6	28	52	20	0,181	0,201	88,594	87,461
7	10	75	15	0,146	0,196	90,800	87,772
8	15	67	28	0,187	0,207	88,216	87,086
9*	15	65	20	0,053	0,135	96,660	91,578
10*	15	70	15	0,099	0,187	93,761	88,334
11	Без смазки $I_{\text{бс}} =$			1,587	1,603		

* Вместо лигнина использован хлорлигнин.

Как видно (табл. 1), смазки № 1, 5 и 9 снижают износ на 94,6–96,7 % для подвижного ролика, на 90,9–93,9 % для неподвижного ролика.

Результаты экспериментов (без учета опытов 9 и 10) были обработаны в пакете Statgraphics Plus. Получены аппроксимирующие зависимости, определяющие покомпонентное влияние состава смазочной композиции x , y , z на износ ролика I_p . Статистические критерии достоверности регрессионных зависимостей приведены в табл. 2.

Для ПР:

$$I_p = 1,5253 - 0,1526x + 0,00381x^2 ; \quad (1)$$

$$I_p = 1,5872 - 0,0470y + 0,00037y^2 ; \quad (2)$$

$$I_p = 1,5136 - 0,1506z + 0,0038z^2 . \quad (3)$$

Для НР:

$$I_p = 1,5442 - 0,1467x + 0,00358x^2 ; \quad (4)$$

$$I_p = 1,6019 - 0,0483y + 0,00040y^2 ; \quad (5)$$

$$I_p = 1,5311 - 0,1440z + 0,00356z^2 . \quad (6)$$

Анализ полученных зависимостей позволил предложить следующие множественные уравнения регрессии, позволяющие прогнозировать величину износа по компонентному составу смазки:

для ПР:

$$I_p = 1,5750 - 0,8264(xyz)^{0,0563} , \quad (7)$$

для НР:

$$I_p = 1,57183 - 0,000225xyz + 1,04 \cdot 10^{-6}(xyz)^{1,5} . \quad (8)$$

Таким образом, наиболее приемлемыми для предотвращения износа в паре трения «колесо – рельс» являются смазочные композиции № 1, 5 и 9, которые состоят из дешевых, доступных компонентов, легко наносятся на рельс, обладают высокой эффективностью и оказывают минимальное экологическое воздействие.

Построим прогнозные оценки износа при следующем изменении состава смазки. Доверительные интервалы прогноза $I_p \pm tS$ ($t = 1,895$ — критерий Стью-

дента; $S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [I_o(i) - I_p(i)]^2}{n-3}}$ — стандартная ошибка,

табл. 2) для регрессионных моделей (7), (8) для уровня значимости 0,10 и числе степеней свободы $n-3 = 7$.

Анализ табл. 3 и табл. 1 показывает, что экспериментальное значение износа попадает в интервалы прогноза, заданные нижней и верхней границами.

В табл. 4 представлены результаты лабораторных испытаний на машине трения смазочных композиций, содержащих полисульфидные полимеры, с разным процентным содержанием серы.

Таблица 2

Статистические критерии достоверности регрессионных зависимостей (1–8)

Номер формулы	Коэффициент детерминации, %	Критерий Дарбина–Уотсона	Стандартная ошибка, S	Средняя абсолютная ошибка, ε
(1)	95,14	1,83	0,124	0,076
(2)	99,37	2,00	0,045	0,026
(3)	94,74	1,78	0,129	0,078
(4)	95,62	1,79	0,116	0,069
(5)	99,54	2,75	0,038	0,025
(6)	94,83	1,94	0,126	0,076
(7)	98,68	1,84	0,065	0,045
(8)	97,55	1,45	0,086	0,060

Таблица 3

Прогнозные оценки износа при изменении состава смазки

Ролик, уравнение регрессии	Состав близок к опыту №	x	y	z	Прогноз износа, I_p, ε	Нижняя граница $I_p - tS$,	Верхняя граница $I_p + tS$,
ПР, (7)	4	21	56	23	0,1070	-0,0161	0,2301
ПР, (7)	5	26	56	18	0,0437	-0,1192	0,2066
НР, (8)	8	16	68	16	0,0437	-0,1192	0,2066
НР, (8)	5	26	56	18	0,0980	-0,0649	0,2609
НР, (8)	4	21	56	23	0,1124	-0,1605	0,2752

Таблица 4

Влияние состава полисульфидного полимера на защитные свойства смазки

Количество часов работы со смазкой	1 час		2 часа		3 часа		4 часа		6 часов											
	3 часа	6 часов	3 часа	6 часов	3 часа	6 часов	3 часа	6 часов	3 часа	6 часов										
Количество часов работы без смазки	ПР	НР	ПР	НР	ПР	НР	ПР	НР	ПР	НР										
Смазка № 1 (полимер из Na_2S_1)	0,603	0,610	1,203	1,387	0,510	0,612	1,234	1,318	0,383	0,401	1,117	1,107	0,123	0,161	0,712	0,694	0,118	0,123	0,535	0,561
Смазка № 2 (полимер из Na_2S_2)	0,583	0,602	1,223	1,294	0,555	0,543	1,162	1,158	0,471	0,462	1,087	1,010	0,264	0,247	0,853	0,871	0,189	0,183	0,394	0,437
Смазка № 3 (полимер из Na_2S_3)	0,412	0,434	0,812	0,796	0,357	0,371	0,732	0,741	0,303	0,298	0,619	0,627	0,261	0,257	0,463	0,482	0,194	0,187	0,417	0,386
Смазка № 4 (полимер из Na_2S_4)	0,342	0,361	0,707	0,723	0,276	0,275	0,672	0,663	0,217	0,210	0,575	0,563	0,195	0,199	0,401	0,384	0,183	0,171	0,293	0,287

Чтобы оценить воздействие противозадирного эффекта присадки из тиокола на данную триботехническую систему, износ роликов определялся несколько раз в течение одного эксперимента. Вначале ролики работали 6 ч в присутствии смазки, которую наносили в зону контакта через каждые 10 мин. Затем смазку с роликов убирали с помощью бензина и ветоши, измеряли результат износа и проводили испытания еще три часа (уже в отсутствие смазки). После этого определяли износ роликов и снова продолжали опыт в течение еще трех часов.

Результаты испытаний свидетельствуют о том, что введение в смазку полимерной присадки, содержащей серу, не только сохраняет и улучшает защитный эффект, но и способствует упрочнению поверхности в зоне трения, так как защитный эффект сохраняется после удаления смазки.

Это позволяет предположить, что серосодержащие полимеры способствуют снижению износа боковой поверхности рельса и гребня колеса при прохождении криволинейных участков не только при непосредственном нахождении смазки в зоне трения, но и спустя некоторое время после ее полного удаления.

Используемые серосодержащие полимерные противозадирные присадки можно, с точки зрения их химического состава, классифицировать на две группы:

1. Полимеры с высоким содержанием серы и низким содержанием хлора. В молекулах этих веществ содержится большое количество полисульфидных цепочек S_n с величиной n от 2 до 4. Под действием механических нагрузок и локальных температур связи $-C-S-$ и $-S-S-$ в полимерах разрываются, что определяет появление в зоне трения «активной серы», способной взаимодействовать с поверхностными атомами металла. Этим обеспечивается сульфидирование поверхности. Вопросам сульфидирования поверхности при использовании серосодержащих присадок в литературе по трению и износу уделяется достаточное внимание. В работе [21] было исследовано образование поверхностных соединений в зоне трения при использовании различных серосодержащих присадок. При этом убедительно показано, что при использовании органических сульфидов и дисульфидов на поверхности образуются сульфиды железа, а при использовании меркаптанов – меркаптиды железа $Fe(SR)_2$.

2. Полимеры со сравнительно низким содержанием серы и высоким (до 15 %, масс.) содержанием остаточного хлора. Сера в их структуру входит, в основном, в виде сульфидных звеньев $C-S-C$, а хлор, с учетом данных работы [9], вероятнее всего, в основном виде фрагментов $CHCl$ с атомом хлора около центрального

атома углерода пропановой цепочки. В силу пространственного строения полимера можно ожидать высокую экранированность атомов хлора другими частями молекулы.

Первичным актом при образовании поверхностных соединений любого типа (сульфидов или хлоридов железа) должен быть разрыв связей в полимерной молекуле за счет термического и механического воздействия в паре трения. В табл. 5 представлены значения энергии связей, присутствующих в молекуле полимеров, используемых в качестве противозадирной присадки [22].

Таблица 5

Значения энергии связей (E) [1]

Связь	C-C	C-H	C-S	S-S	C-Cl
$E, \text{кДж/моль}$	344	415	259	182	328

Из табл. 5 следует, что наиболее легко должны разрываться сульфидные и полисульфидные связи. То есть сульфидирование поверхностей трения должно происходить предпочтительнее (легче и быстрее), чем хлорирование (особенно для полимеров с высоким содержанием серы).

Результаты измерения износа роликов, которые проработали определенное число часов со смазкой и далее 3 или 6 часов без смазки, представлены на рис. 1 и 2.

Очевидно, что полимеры с большим содержанием серы уже после одного часа работы со смазкой дают положительный результат, то есть способствуют снижению бокового износа и после удаления смазки. Очевидно, что этого времени достаточно, чтобы произошло сульфидирование поверхности, то есть в зоне контакта образовалась сульфидная пленка, которая упрочняет и защищает контактирующую поверхность от износа.

Полимеры, содержащие больше остаточного хлора (смазка 1), также проявляют защитный эффект, но он становится заметным только после трех часов работы пары трения со смазкой. Здесь происходит замедленное образование сульфидов, образование хлоридов не может происходить быстро в силу указанных выше причин (экранированность атомов хлора другими частями молекулы полимера и высокая энергия связи $C-Cl$).

Полимеры со средним содержанием серы и остаточного хлора (рис. 2) проявляют защитный эффект уже после одного часа работы со смазкой, и кривые для них более плавные. На основании этого можно сделать вывод, что защитный эффект присадке обеспечивают как атомы серы, так и атомы хлора.

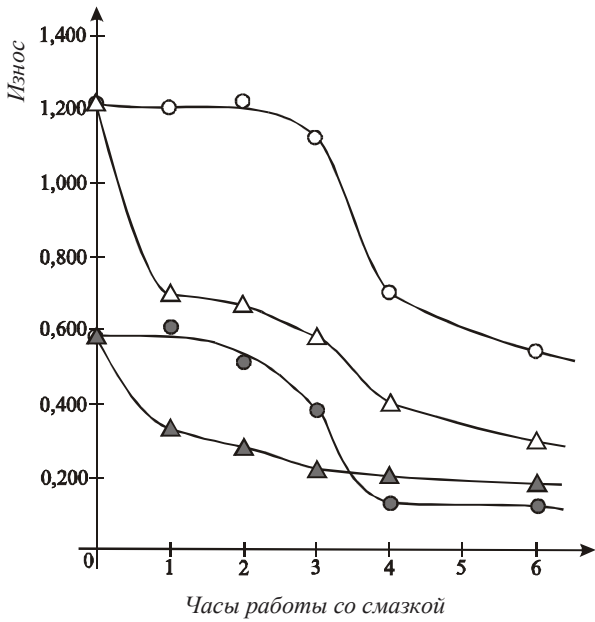


Рис. 1. Износ роликов при использовании в смазке полимеров № 1 и № 4: ○ — смазка № 1, работа без смазки (y) 6 часов; ● — смазка № 1, $y = 3$; Δ — смазка № 4, $y = 6$ часов; ▲ — смазка № 4, $y = 3$ часа

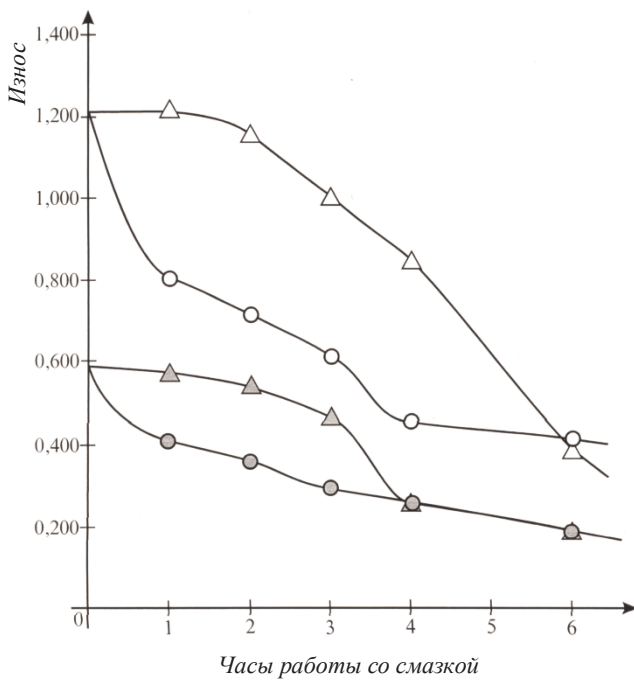


Рис. 2. Износ роликов при использовании в смазке полимеров № 2 и № 3: ● — смазка № 2, $y = 3$; ▲ — смазка № 3, $y = 3$ часа; ○ — смазка № 2, $y = 6$; Δ — смазка № 3, $y = 6$

Присадки, содержащие серу и хлор, являются универсальными, ведут себя удовлетворительно как в режиме высоких нагрузок, так и при высоких скоростях и низких нагрузках. Сера снижает трение и усиливает противозадирный эффект, обеспечиваемый хлором.

Математическое моделирование разработанных смазочных композиций. Для количественного описания влияния содержания серы и хлора в полимерных присадках на износ получены регрессионные уравнения общего вида $I_p = f(t)$, где I_p — износ за x часов ра-

боты без смазки, а t — часы предварительной работы со смазкой. В табл. 6 приведены полученные уравнения регрессии, критерии достоверности которых указаны в табл. 7. При выборе аппроксимирующих зависимостей исходили из максимизации критерия детерминации R^2 . Если разница в значениях R^2 для нелинейной и линейной регрессий была невелика, то выбирали линейную регрессию.

На рис. 3 в качестве примера сопоставлены результаты расчета по модели (16) с экспериментальными данными.

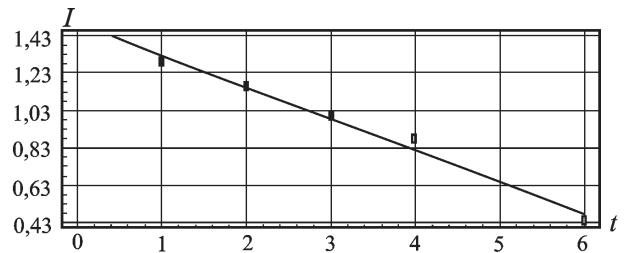


Рис. 3. Зависимость износа I от времени t работы без смазки: точки — опытные данные; линия — уравнение регрессии

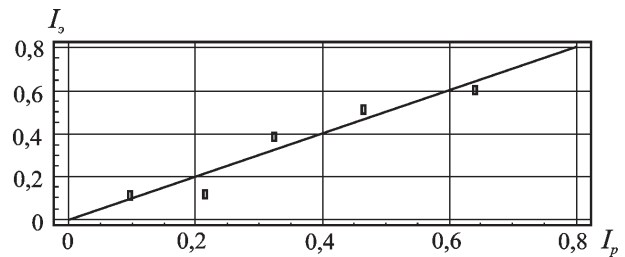


Рис. 4. Зависимость экспериментальных значений износа (I_o) от предсказанных по формуле (16) значений (I_p)

Действительное значение $I(t_i)$ для аргумента t_i можно представить в виде:

$$I(t_i) = I_p(t_i) + e_i,$$

где I_p — значение износа, вычисленное по уравнению (16) для времени работы без смазки t_i ; i — номер опыта; $e_i = I_o(t_i) - I_p(t_i)$ — величина остатка, случайная, ненаблюдаемая переменная. На рис. 5 приведена зависимость e_i от $I_p(t_i)$.

Как видно (рис. 3–5), уравнение регрессии (16) достаточно точно описывает экспериментальные данные

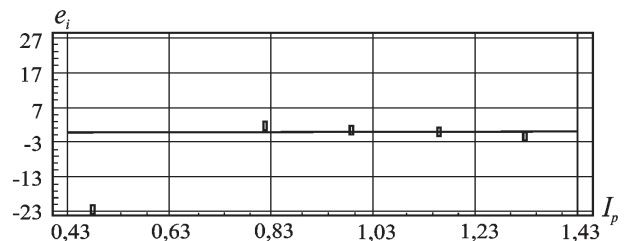


Рис. 5. Зависимость остатков e_i от предсказанных значений I_p , вычисленных по уравнению регрессии (8)

Таблица 6

Регрессионные уравнения модели износа

Ролик	№ смазки	$x = 3$ часов работы без смазки	$x = 6$ часов работы без смазки
ПР	1	$I_p = 0,8484 - 0,2550t + 0,0166t^2$ (9)	$I_p = 1,2860 + 0,1115t - 0,1424t^{1,3}$ (10)
НР	1	$I_p = 0,8533 - 0,1946t + 0,0114t^2$ (11)	$I_p = 1,6033 - 0,1844t$ (12)
ПР	2	$I_p = 0,6940 - 0,0880t$ (13)	$I_p = 1,4880 - 0,1700t$ (14)
НР	2	$I_p = 0,7011 - 0,0918t$ (15)	$I_p = 1,4984 - 0,1701t$ (16)
ПР	3	$I_p = 0,4445 - 0,0435t$ (17)	$I_p = 0,8790 - 0,0845t$ (18)
НР	3	$I_p = 0,4673 - 0,0494t$ (19)	$I_p = 0,8874 - 0,0878t$ (20)
ПР	4	$I_p = 0,4301 - 0,0971t + 0,0093t^2$ (21)	$I_p = 0,8184 - 0,0902t$ (22)
НР	4	$I_p = 0,43554 - 0,1090t + 0,0104t^2$ (23)	$I_p = 0,8241 - 0,0938t$ (24)

Таблица 7

Критерии достоверности регрессионных зависимостей

Номер формулы	Коэффициент детерминации, %	Критерий Дарбина-Уотсона	Стандартная ошибка, S, z	Средняя абсолютная ошибка, z
(9)	91,872	2,680	0,089	0,051
(10)	89,282	2,730	0,146	0,083
(11)	88,737	2,511	0,112	0,063
(12)	91,819	2,719	0,122	0,081
(13)	91,834	2,745	0,058	0,040
(14)	93,736	1,369	0,098	0,067
(15)	92,136	2,882	0,060	0,038
(16)	98,589	1,861	0,045	0,030
(17)	98,442	1,454	0,012	0,008
(18)	92,199	2,357	0,054	0,034
(19)	96,958	1,449	0,019	0,014
(20)	96,240	2,551	0,038	0,023
(21)	99,672	3,465	0,005	0,003
(22)	95,410	2,650	0,044	0,031
(23)	98,398	2,880	0,014	0,007
(24)	95,566	2,756	0,045	0,029

Полученные уравнения позволяют не только предсказать величину износа при израсходовании смазки, но и дополнительно подтверждают механизм защитного действия полимерных присадок, содержащих серу и хлор.

Несмотря на то, что аппроксимацию полиномами 2-го, 3-го и 4-го порядков лучше описывают экспериментальные данные, их прогностические характеристики (прогноз увеличения работы со смазкой больше 6 часов) лишены физического смысла. Для уравнения 2-го порядка износ становится отрицательным, а для полиномов 3-го и 4-го порядков износ резко возрастает после увеличения времени работы со смазкой более 6 часов, хотя последствие смазки (образование пла-

стичного защитного слоя на поверхности металла) должно либо возрасти, либо остаться на уровне 6 часов работы со смазкой.

В целом защитное действие смазки лучше всего описывается экспоненциальной зависимостью износа от времени работы машины трения со смазкой ($y = a e^{-bx}$), коэффициент b имеет большее абсолютное значение для моделей, соответствующих 3 часам работы без смазки, что свидетельствует о том, что защитный слой, образующийся на поверхности в течение 3 часов, практически полностью защищает поверхность металла от износа даже при полном отсутствии смазки.

Таким образом, предлагается композиция для предотвращения износа в паре трения «колесо – рельс»,

которая состоит из дешевых, доступных компонентов, легко наносится на рельс, обладает высокой эффективностью и оказывает минимальное экологическое воздействие на человека и окружающую среду. Полученные аппроксимирующие зависимости позволяют достаточно точно прогнозировать износ в паре трения «колесо – рельс» в зависимости от состава смазочной композиции.

Выводы

1. Предложено решение задачи снижения износа в паре «колесо – рельс» применительно к условиям Восточно-Сибирской железной дороги ОАО «РЖД» путем применения новых смазочных композиций на основе низкомолекулярного полиэтилена и природного полимера лигнина.

2. Создана новая смазочная композиция на основе низкомолекулярного полиэтилена для процесса лубрикации пары «колесо – рельс», что позволило снизить затраты на лубрикацию и частично решить проблему утилизации отходов химического производства (лигнина, нефтяного кокса, низкомолекулярного полиэтилена).

Литература

1. Лысюк В.С. Проблема износа колес и рельсов. М.: Транспорт, 1997. 188 с.

2. Коган А.Я. Оценка износа рельсов и бандажей колесных пар при движении в кривых участках пути // Вестн. ВНИИЖТ. 1990. № 2. С. 36-40.

3. Перцев А.Н. О причинах износа колес и рельсов // Железнодорожный транспорт. 1998. № 12. С. 50-51.

4. Шишмарев А.А., Никулин А.Н., Коротаев Б.В. О влиянии ширины колеи на износ рельсов // Путь и путевое хозяйство. 1999. № 5. С. 16-18.

5. Марков Д.П. Триботехнические характеристики элементов пары трения колесо-рельс // Трение и износ. 1995. Т. 16. № 1. С. 138-156.

6. Шур Е.А., Бычкова Н.Я. Влияние внутренних факторов на износ рельсовой и колесной стали. Трибология и транспорт // Материалы научно-практического симпозиума. Кн. 3. Рыбинск, 1995.

7. Ахмадеева А.А., Гозбенко В.Е. Динамические свойства вагона с двухступенчатом рессорным подвешиванием // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2010. № 4. С. 60-69.

8. Карпущенко Н.И. Смазка - единственный способ предупреждения износа // Путь и путевое хозяйство. 2000. № 2. С. 15-18.

9. Ахмадеева А.А., Гозбенко В.Е. Определение главных координат вагона с двухступенчатом рессорном подвешиванием // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 4. С. 71-76.

10. Гозбенко В.Е., Хоменко А.П. Изменение динамического состояния упругосвязанных систем. Иркутск, 2002. 37 с. Рус. Деп. в ВИНТИ 23.07.02, № 1379-B2002.

11. Эрадзе Д.Г., Карпачевский Г.В. Влияние ширины колеи на износ рельсов и гребней колес // Путь и путевое хозяйство. 1999. № 1. С. 14-16.

12. Гозбенко В.Е., Ахмадеева А.А. Вертикальные колебания экипажа с учетом неровностей пути // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 3 (39). С. 56-59.

13. Воротилкин А.В., Гозбенко В.Е., Каргапольцев С.К., Хоменко А.П., Корчевин Н.А. Композиция для снижения износа в паре трения колесо - рельс: пат. 2318013 Рос. Федерация. № 2006131639/04; заявл. 01.09.2006; опубл. 27.02.2008, 4 с.

14. Винокуров Д.И., Гозбенко В.Е. Создание и моделирование новых смазочных композиций для лубрикации из отходов химического производства // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 1. С. 148-156.

15. Винокуров Д.И., Гозбенко В.Е., Якимова Г.А., Корчевин Н.А. Трибохимические реакции в зоне трения колесо-рельс при использовании нетрадиционных смазочных композиций // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 2. С. 190-193.

16. Хоменко А.П., Воротилкин А.В., Винокуров Д.И., Гозбенко В.Е., Гоготов А.Ф., Дронов В.Г., Каргапольцев С.К., Корчевин Н.А., Чуринова О.В., Якимова Г.А. Использование хлорированного лигнина в качестве противозадирной присадки в смазочных композициях для тяжело нагруженных узлов трения: пат. 2439138 Рос. Федерации. № 2009149367/04; заявл. 29.12.2009; опубл. 10.01.2012, 4 с.

17. Воротилкин А.В., Каргапольцев С.К., Гозбенко В.Е. Математическая модель динамического взаимодействия в системе "колесо-рельс" с учетом их лубрикации. Иркутск, 2006. Деп. рукоп. № 152-B2006 13.02.06.

18. Воротилкин А.В., Каргапольцев С.К., Гозбенко В.Е. Математическое моделирование влияния степени помола лубриката на износ в системе «колесо-рельс». Иркутск, 2006. 22 с. Рус. Деп. в ВИНТИ 13.02.06, № 151-B2006.

19. Гозбенко В.Е., Винокуров Д.И. Моделирование смазочных материалов, снижающих износ элементов пути и ходовых частей подвижного состава // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 2. С. 132-138.

20. Кулиев Р.Ш. Получение синтетических масел с низкими пределами вязкости // Химия и технология топлив и масел. 2000. № 1. С. 32-35.

21. Назаров Н.С., Якимова Г.А., Русавская Н.В., Ясько С.В., Гозбенко В.Е., Корчевин Н.А. Использование отходов производства в композициях для лубрикации рельсов. Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та. 2003. 244 с.

22. Гуревич Л.В., Карачевцев Г.В., Кондратьев В.Н., Лебедев Ю.А., Медведев В.А., Потапов В.К., Ходеев Ю.С. Энергия разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и средство к электрону. М.: Наука, 1974. 351 с.

References

1. Lysyuk V.S. A problem of deterioration of sprockets and rails. M.: Transport, 1997. 188 p.

2. Kogan A.Ya. Estimation of deterioration of rails and bindings of wheel pairs at driving in curve track sections // Vestn. VNIIZhT. 1990. № 2. P. 36-40.

3. Pertsev A.N. About causes of wear of sprockets and rails // *Zheleznodorozhnyi transport*. 1998. № 12. P. 50-51.
4. Shishmarev A.A., Nikulin A.N., Korotaev B.V. About agency of a track gauge on deterioration of rails // *Put' i putevoe khozyaistvo*. 1999. № 5. P. 16-18.
5. Markov D.P. Tribotechnical of performance of units of a friction pair a sprocket-rail // *Friction and Wear*. 1995. T. 16. № 1. P. 138-156.
6. Shur E.A., Bychkova N.Ya. Agency of heartwood factors on deterioration of a rail and wheeled steel. A tribology and a carrier // *Materialy nauchno-prakticheskogo simpoziuma*. Kn. 3. Rybinsk, 1995.
7. Akhmadeeva A.A., Gozbenko V.E. Dynamic properties of the carriage with two-stage leaf-spring suspension // *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2010. № 4. P. 60-69.
8. Karpushchenko N.I. Lubricant - a single mode of the forestalling of deterioration // *Put' i putevoe khozyaistvo*. 2000. № 2. P. 15-18.
9. Akhmadeeva A.A., Gozbenko V.E. Determination of the chief co-ordinates of the carriage with two-stage leaf-spring suspension // *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2011. № 4. P. 71-76.
10. Gozbenko V.E., Homenko A.P. Modification of a dynamic condition it is elastic the linked systems . The deposited manuscript. Irkutsk, 2002. 37 p. Rus. Dep. VINITI 23.07.02, № 1379-B2002.
11. Eradze D.G., Karpachevskii G.V. Influence of a track gauge on deterioration of rails and heckles of sprockets // *Put' i putevoe khozyaistvo*. 1999. № 1. P. 14-16.
12. Gozbenko V.E., Akhmadeeva A.A. Vertical vibrations of the crew, taking into account the rough ways // *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2013. № 3 (39). P. 56-59.
13. Vorotilkin A.V., Gozbenko V.E., Kargapoltsev S.K., Homenko A.P., Korchevin N.A. Composition for deterioration drop in a friction pair a sprocket - a rail. pat. 2318013 Rus. Federation. № 2006131639/04; appl. 01.09.2006; publ. 27.02.2008, 4 p.
14. Vinokurov D.I., Gozbenko V.E. Making and simulation of new lubricating compositions for lubricant from chemical production scrap // *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2011. № 1. P. 148-156.
15. Vinokurov D.I., Gozbenko V.E., Yakimova G.A., Korchevin N.A. Tribochemical reaction zone of friction wheel-rail using unconventional lubricant compositions// *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2011. № 2. P. 190-193.
16. Homenko A.P., Vorotilkin A.V., Vinokurov D.I., Gozbenko V.E., Gogotov A.F., Dronov V.G, Kargapoltsev S.K., Korchevin N.A., Churinova O.V, Yakimova G.A. Utilization of the chlorinated lignin in the capacity of extreme pressure additive in lubricating compositions for hardly weighted abrasion knots. pat. 2439138 Rus. Federation. № 2009149367/04; appl. 29.12.2009; publ. 10.01.2012, 4 p.
17. Vorotilkin A.V., Kargapoltsev S.K., Gozbenko V.E. A mathematical model of dynamic interacting in system "sprocket-rail" taking into account them lubricant. Irkutsk, 2006. Dep. rukop. № 152-V2006 13.02.06.
18. Vorotilkin A.V., Kargapoltsev S.K., Gozbenko V.E. Mathematical simulation of agency of a fineness lubricant on deterioration in system "sprocket-rail". Irkutsk, 2006. 22 p. Rus. Dep. VINITI 13.02.06, № 151-B2006.
19. Gozbenko V.E., Vinokurov D.I. Simulation of the lubricating oil reducing deterioration of units paths and running gears of a rolling stoc // *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2012. № 2. P. 132-138.
20. Kuliev R.Sh. Obtaining of synthetic oils with low limits of viscosity // *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2000. № 1. P. 32-35.
21. Nazarov N.S., Yakimova G.A., Russavskaya N.V., Yas'ko S.V., Gozbenko V.E., Korchevin N.A. Residue utilization of production in compositions for lubricant rails. Irkutsk: Izd-vo Irkut. gos. un-ta. 2003. 244 p.
22. Gurevich L.V., Karachevtsev G.V., Kondrat'ev V.N., Lebedev Yu.A., Medvedev V.A., Potapov V.K., Khodeev Yu.S. Energy of chemical bonds. Potentials of ionization and electron affinity. M.: Nauka, 1974. 351 p.