

А.М. Керопян, К.И. Шахова, П.М. Вержанский

ВЛИЯНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В ЗОНЕ КОНТАКТА КОЛЕС КАРЬЕРНЫХ ЛОКОМОТИВОВ НА ИХ ТЯГОВУЮ СПОСОБНОСТЬ

Приведены результаты теоретико-экспериментальных исследований условий водородного износа как одного из ведущих видов изнашивания при разрушении взаимодействующих поверхностей системы колесо – рельс подвижного состава карьерного железнодорожного транспорта. Рассмотрено влияние состава дисперсных загрязнений и температуры в зоне контакта на износные процессы на поверхностях трения колес карьерных локомотивов и рельсов.

Ключевые слова: открытые горные работы, карьерный железнодорожный транспорт, водородный износ, система колесо – рельс, дисперсные загрязнения, температура в зоне контакта.

Практика эксплуатации железнодорожного транспорта показывает, что сцепление колес с рельсами во многом зависит от состава и свойств дисперсных слоев, находящихся на поверхности рельсов [1, 2]. Также известно, что основу поверхностных загрязнений рельсов составляют продукты износа и частицы, заносимые извне под колеса поезда. Состав дисперсных загрязнений может влиять на механические свойства колес и рельсов [3].

Условно источники поверхностного загрязнения колес и рельсов можно разделить на постоянно и временно действующие. Постоянное пополнение происходит от продуктов механического износа колес и рельсов, вызванного трением, а также продуктов коррозионного износа. Сюда также входят твердые загрязнения, заносимые потоками воздуха с железнодорожного полотна, аэрозольные загрязнения, конденсационная влага, смазка и частицы транспортируемой горной массы, выпадающие с подвижного состава. К числу временно действующих источников поверхностных загрязнений следует отнести

атмосферные осадки, продукты износа колес и тормозных колодок при торможении, вызванном нарушением установленного режима ведения состава, а также песок, подаваемый для стабилизации сцепления при прохождении сложных участков пути.

Результаты многочисленных исследований показывают, что в основе механического износа лежат усталостные процессы, развивающиеся в контактной зоне трущихся тел [3, 4, 5, 6]. Износ, как процесс механического разрушения материала, происходит в результате возникновения локальных напряжений и деформаций в зоне фактического контакта. При качении колеса по рельсу происходит многократное нагружение зоны контакта. В случае приложения к колесу тормозного или тягового усилия, микровыступы трущихся тел нарушаются еще больше. При трении двух тел неровности одного тела неоднократно деформируют поверхностный слой другого тела. При этом одни и те же точки на поверхностях трения испытывают микродеформации типа растяжение-сжатие с различными амплитудами и частотами. В результате

таких воздействий в поверхностном слое накапливаются усталостные микрповреждения и происходит отделение частиц и в зоне трения колеса с рельсом появляются продукты износа металла, входящие в состав дисперсных загрязнений (рис. 1).

Следует отметить, что скорость скольжения колес по рельсам оказывает существенное влияние на износ системы колесо – рельс. Достаточно сказать, что увеличение скорости скольжения колес с 0,8 до 2% вызывает увеличение износа рельсов в 2,3 раза. Частицы металла после отделения от трущихся тел (колеса и рельса) остаются на поверхностях трения и участвуют в образовании поверхностного слоя [3].

В связи с тем, что контакт шероховатых поверхностей, каковыми являются колесо с рельсом, носит дискретный характер, поверхностные загрязнения, заполняя пустоту между выступами, могут способствовать увеличению площади истинного контакта между телами [3, 7, 8]. Дисперсные системы, подобные рассмотренным поверхностным загрязнениям, в зависимости от содержания в них жидкой фазы способны сильно менять структурно-реологические характеристики, приближаясь то к свойствам твердых тел, то к пастам, то к жидкостям. Тем самым поверхностные слои могут значительно влиять на процесс формирования фрикционного контакта и на сцепление колес с рельсами.

С учетом выполненных ВНИИЖТ исследований можно утверждать, что зависимость изменения механических свойств дисперсного слоя и рабочих поверхностей колес и рельсов меняется по линиям AC (кривая 2) и DE (кривая 1), представленным на рис. 2 [3].

На участке АВ (кривая 2) происходят процессы в поверхностном загрязнении, что характерно для статического трения и при движении колеса

по рельсу с небольшим скольжением. На этом интервале по мере увеличения тепловой энергии в зоне трения, затрат дополнительной мощности и повышения средней температуры из поверхностного загрязнения трущихся тел постепенно удаляются влага и органические загрязнения. Механические же характеристики материала колес и рельсов с повышением температуры постепенно падают (кривая 1, участок DB).

На интервал температур 400–500 °С приходится и интенсивное начало роста износа чистых поверхностей ряда материалов, происходящего за счет

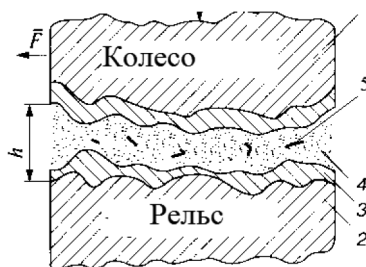


Рис. 1. Схема взаимодействия колеса с рельсом в условиях наличия загрязнений: 3 – поверхностное загрязнение; 4 – дисперсный слой загрязнения; 5 – продукты износа; h – усредненная толщина «третьего» тела

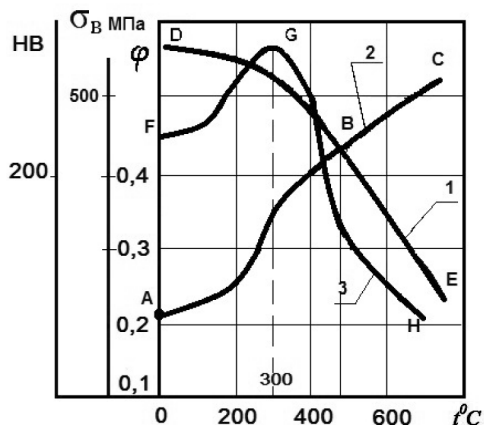


Рис. 2. Зависимость изменения твердости поверхности колес и рельсов НВ (1), коэффициента трения φ (2) и предела прочности σ_v (3) от температуры t в зоне их фрикционного взаимодействия

пластического течения поверхностных слоев [9].

Можно считать, что при трении реальных поверхностей колес и рельсов, покрытых специфическими дисперсными слоями загрязнений, температура 400–450 °С может оказаться критической. Ниже этой температуры реализуется положительный градиент механических свойств по глубине контакта трущихся тел, т.е. $dt/dz > 0$, где t – разрушающее напряжение в плоскости скольжения (в данном случае в слое поверхностного загрязнения); z – координата, перпендикулярная плоскости контакта колеса с рельсом. И это является важнейшим условием нормального протекания фрикционного процесса. При температурах выше 400–450 °С механические свойства дисперсного слоя начинают превосходить механические свойства материала колес и рельсов и в зоне трения начинает реализовываться отрицательный градиент механических свойств трущихся тел, т.е. $dt/dz < 0$. Дисперсный слой загрязнения при этих температурах приобретает свойства, эквивалентные абразиву, основные деформации преимущественно смещаются в слой металла, и это становится неременной причиной роста интенсивности износа материала колес и рельсов.

При дальнейшем повышении температуры в зоне контакта системы колесо – рельс дисперсные загрязнения приобретают свойства абразива, вследствие чего коэффициент трения продолжает расти (участок *BC*, кривая 2), в то время как прочностные характеристики взаимодействующих поверхностей колес и рельсов резко снижаются (участок *BE*, кривая 1). При этом металл размягчается и, в связи с увеличением пластичности, начинается процесс течения металла в поверхностных слоях взаимодействующих поверхностей.

Таким образом, непревышение температуры в 400 °С с некоторым запасом можно рассматривать как неременное условие для избегания интенсивного износа колес и рельсов.

С другой стороны, для большинства материалов механические характеристики (пределы пропорциональности, упругости, текучести, прочности) при повышении температуры уменьшаются, а при понижении – увеличиваются. Характеристики пластичности (относительное остаточное удлинение и сужение при разрыве), наоборот, при повышении температуры увеличиваются, а с понижением – уменьшаются. С ростом температуры уменьшается модуль упругости E и увеличивается коэффициент Пуассона μ . При понижении температуры наблюдается обратное явление [10].

На рис. 2 (кривая 3) показана зависимость предела прочности σ_b от температуры для углеродистой стали.

При нагревании до $t = 300$ °С (рис. 2, кривая 3) углеродистых сталей временное сопротивление (предел прочности) сначала повышается (участок *FG*), потом резко снижается (участок *GH*). В свою очередь, характеристики пластичности сначала уменьшаются (до $t = 300$ °С), потом увеличиваются.

Сравнительный анализ графиков 1, 2, 3 на рис. 2 показывает, что исходя из обеспечения критерия предела прочности следует ограничить температуру в зоне контакта рабочих поверхностей колеса и рельса в пределах 300 °С.

Защита от водородного изнашивания имеет особое значение для железнодорожного транспорта (повышение скоростей поездов и безопасности их вождения связано с созданием более эффективных тормозов); попытка применения пластмассовых тормозных колодок желаемых результатов не дала вследствие усиленного водородного

изнашивания бандажей колес; водородному изнашиванию подвергаются рельсы и колеса вагонов. Техника, используемая на севере страны, также подвержена водородному изнашиванию. Одной из причин быстрого изнашивания машин, работающих на севере, является охрупчивающее действие водорода, который при низких температурах не рассасывается в поверхностных слоях, а концентрируется в зоне трения между взаимодействующими поверхностями трущихся деталей [11].

Вследствие существующих условий эксплуатации, поверхности трения колес и рельсов на карьерном железнодорожном транспорте находятся под постоянным воздействием атмосферной коррозии и коррозионной эрозии. Процессу коррозионного разрушения во многом способствуют механические напряжения в трущихся телах, дефекты поверхности (микрощели и впадины), твердые частицы и посторонние газы, загрязняющие воздух, влага. Основными элементами загрязнений от песка, подаваемого для улучшения сцепления, и пыли, заносимой с поверхности почвы и земляного полотна, являются кварцевый песок, алюмосиликаты, глиноземы и другие вещества [12].

Исследованиям состава и структуры поверхностных загрязнений железнодорожного транспорта общего пользования посвящены работы [3, 12, 13, 14 и др.], однако для условий открытых горных работ аналогичных широкомасштабных исследований не проводилось. В связи с этим нами были проведены соответствующие исследования, с целью заполнения данного пробела.

Для исследования состава поверхностных загрязнений были исследованы образцы с рельсов руководящего уклона угольного карьера Бородинского разреза СУЭК (г. Красноярск). Элементный анализ взятых образцов

загрязнений выполнен в лаборатории микроанализа ИХЭОС РАН (г. Москва) на СНН анализаторе и методом рентгенофлуоресцентного анализа на спектрометре VRA-30, Германия [15].

С целью подтверждения достоверности проведенных исследований были проведены аналогичные исследования образцов загрязнений, взятых с того же карьера, в аналитическом, сертификационном и эколого-аналитическом центре «АНСЕРТЭКО» при Московском государственном институте стали и сплавов (МИСиС). Анализ выполнен с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра ОПТИМ'Х фирмы Thermo Elektron Corporation и газоанализатора Лекос CS 144, с получением результатов со стандартным отклонением 3%, что не ниже по точности определения химического состава по ГОСТ 22536-1 [16].

Для сравнения составов загрязнений приняты результаты анализов лабораторных исследований образцов, взятых с участка затяжного подъема ст. Поварово Московской железной дороги, обслуживаемой электровазонами ВЛ 8 [12, 17], приведенные в таблице. В состав прочих элементов столбцов 2 и 3 входят калий, никель, хром, стронций, вода, смазка и др.

Толщина слоя поверхностного загрязнения неоднородна по ширине и длине дорожек трения. Наиболее тонкие слои, имеющие наибольшую поверхностную энергию, располагаются в центральной части дорожек катания колес по рельсам, а наиболее толстые и более крупные частицы загрязнений находятся на внешней стороне дорожек катания. Это объясняется тем, что в процессе диспергирования частиц загрязнений, оказавшихся в зоне контакта колеса с рельсом, происходит их сегрегация, в результате которой наиболее крупные фракции загрязнений вытесняются на периферию дорожки катания, где нормальные и

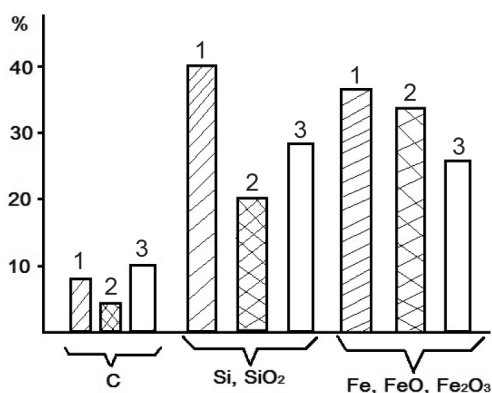


Рис. 3. Процентный состав поверхностных загрязнений железнодорожных рельсов по данным: 3 – ВНИИЖТ; 1 – ИНЭОС РАН; 2 – ООО «АНСЕРТЭКО»

касательные напряжения меньше, чем в центральной ее части.

Сравнение структуры загрязнений магистральных и карьерных рельсовых путей показывает, что существенной разницы в их номенклатуре не наблюдается, однако есть разница в их количественном составе. В первую очередь обращает на себя внимание то обстоя-

тельство, что на рельсах Бородинского бурогоугольного разреза выявлено значительно большее содержание окиси кремния, железа и железосодержащих окислов и в то же время обнаружено меньшее количество окиси магния и углерода. Это объясняется коренными различиями условий эксплуатации подвижного состава.

Сравнительный состав загрязнений поверхностей рельсов Бородинского угольного карьера и одного из участков железной дороги общего пользования Московской области показан на диаграмме, приведенной на рис. 3, где показаны данные исследований: незаштрихованными прямоугольниками – ВНИИЖТ; заштрихованными прямоугольниками – ИНЭОС РАН; прямоугольниками с двойной штриховкой – ООО «АНСЕРТЭКО» (МИСиС). Более низкий процент содержания кремния по данным ООО «АНСЕРТЭКО» объясняется тем, что исследуемый образец загрязнений был взят в зоне «остряка», где применение песка пра-

Сравнительная таблица исследований элементного состава загрязнений рабочей поверхности железнодорожных рельсов

Элементы загрязнения	Название участка, где брались пробы		
	Угольный карьер «Бородино», %		Усредненные данные анализов ВНИИЖТ, %
	Исследования ИНЭОС РАН	Исследования «АНСЕРТЭКО»	
1	2	3	4
Кремний, включая окислы	40± 2	21,8	28,0
Железо, включая окислы	36±2	34,7	25,0
Углерод	4,5	2,75	12,0
Окись кальция	4±2	не выявлен	3,3
Кальций	не выявлен	0,5	не выявлен
Водород	0,39	*	не выявлен
Окись алюминия	8±2	не выявлен	1,5
Алюминий	не выявлен	0,5	не выявлен
Окись магния	≤ 1-2	не выявлен	2,1
Сера	2	0,3	0,4
Прочие	4	38,55	23,0

* Легкие элементы с порядковым номером менее 9, в том числе – водород, по периодической системе Д.И. Менделеева методом, применяемым ООО «АНСЕРТЭКО», не идентифицируются.

вилами эксплуатации железнодорожного пути не рекомендуется. При исследовании того же образца загрязнений рельсового пути выявлено более низкое содержание углерода, чем в образце, взятом в зоне выездной траншеи того же карьера. Данное обстоятельство, возможно, свидетельствует о том, что в зоне «остряка», вследствие высоких продольных и поперечных контактных напряжений, происходит интенсивный износ в условиях обезуглероживающего действия водорода (см. таблицу).

Известно, что условия эксплуатации открытых разработок отличаются, в частности, повышенными углами подъема рельсовых путей (до 60‰) и нагрузками на ось локомотива (до 350 кН). В связи с этим для обеспечения требуемого тягового усилия появляется необходимость подачи большего количества песка под колеса локомотива и, как следствие, при повышенных контактных нагрузках при наличии избытка песка проявляются явления усталостного и абразивного износа контактных поверхностей системы колесо – рельс. Кроме этого, при погрузке состава в забое требуется непрерывная работа локомотива в режиме пуск – стоп, что приводит к более тяжелым условиям работы в режимах тяги и торможения локомотивов. Поэтому, для обеспечения надежных условий сцепления необходимо управлять этим процессом при помощи подачи песка. В результате все это способствует повышенному износу колес и рельсов карьерного подвижного состава. Кроме того, угольная пыль, попавшая на рельсы в условиях карьера, содержит окись кремния, что в свою очередь способствует повышенному износу рабочих поверхностей колес и рельса. Это подтверждается исследованиями проф. Г.И. Солода, который при испытаниях редукторов горных машин, работающих в гор-

ных шахтах, установил наличие окиси кремния в угольной пыли [18].

Определенный интерес представляет факт наличия водорода в составе образцов загрязнений рельсов с Бородинского карьера. Присутствие водорода в составе дисперсных загрязнений объясняется наличием водородосодержащих веществ, которые находятся в зоне контакта колеса с рельсом.

Многочисленными исследованиями показано, что зарождение усталостных трещин и характер их роста определяются не только структурой и статическими прочностными свойствами, но и характером и уровнем приложенных нагрузок, а также температурой взаимодействия [5]. Но, независимо от вида нагружения, разрушение наступает в момент накопления определенной энергии упругой деформации в данном объеме [6].

Рассматривая механизм отделения продуктов износа при трении в таких условиях, нельзя не учитывать процесс наводороживания поверхностей трения, тем более, что этот процесс непосредственно связан с колебаниями температуры и приложенной нагрузки (рис. 4) [3]. При малой скорости деформации и низкой температуре водород, накапливаясь в микрообъемах металла, обладающих повышенной свободной энергией, образует повышенные концентрации около дислокаций и тормозит их перемещение, охрупчивая металл. Более того, водород, выделяясь вблизи зерен карбидов или шлаковых включений, может образовывать флокены [11].

В зависимости от температуры водород может переходить в ионизированное состояние. Уже при температуре 300 °С молекулы водорода могут разлагаться на ионы, которые свободно могут перемещаться по кристаллической решетке [3, 19]. Они, совершенно свободно перемещаясь в межкри-

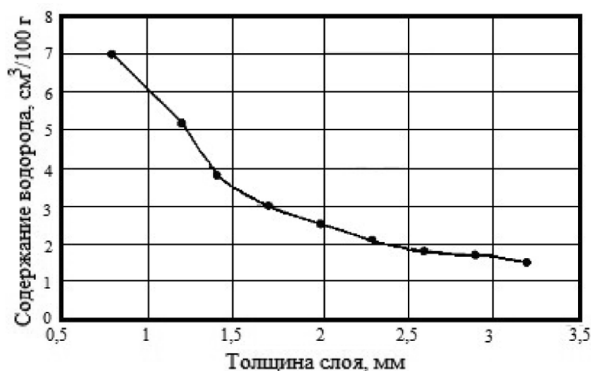


Рис. 4. Содержание свободного диффузионного водорода в поверхностном слое металла железнодорожного рельса

сталлическом пространстве, скапливаются в местах, где имеется избыточная свободная поверхностная энергия, т.е. там, где есть трещины, сдвиги и другие дефекты кристаллической решетки.

В зависимости от температуры окружающей среды, концентрация водорода в металле может быть разная. Исследованиями [11, 19, 20] установлено, что в рельсовых сталях процент содержания водорода зависит от условий эксплуатации. Водород в металле образуется только за счет адсорбции ионов водорода, получившихся в результате деградации находящихся на поверхности рельсов водородосодержащих веществ, далее, ионы водорода, скапливаясь в местах, где имеются дефекты кристаллической решетки, т.е. где есть некомпенсированные межмолекулярные связи, в дальнейшем могут взаимодействовать с железом стали, что в результате приведет к ее обезуглероживанию. Таким образом, в местах скопления водорода могут образоваться области металла с «захваченным» водородом, т.е. получится область металла с химически связанным водородом. Это приводит к более сильному изменению механических свойств стали в области дефекта: происходит охрупчивание, уменьшение прочности, т.к. по существу обезуглероженная сталь не что иное, как чистое железо.

Помимо химического взаимодействия ионов водорода с металлом, может происходить и его рекомбинация (молизация), т.е. из двух ионов водорода при определенных энергетических состояниях может образоваться молекула водорода, которая увеличивает собственный объем в 8 раз [3]. Это приводит к значительному увеличению внутренних напряжений при охлаждении металла, что характерно для климатических условий открытых раз-

работок месторождений Российской Федерации. Выполненный анализ позволяет объяснить одну из вероятных причин возникновения флокенов. Исследованиями установлено, что причиной образования флокенов являются внутренние напряжения, связанные с деформацией и охлаждением металла, и напряжения, создаваемые присутствующим в металле водородом. При отсутствии одного из двух вышеупомянутых условий флокены в стали не образуются [21].

Элементный анализ образцов загрязнений поверхности железнодорожных рельсов Бородинского разреза СУЭК, выполненный в лаборатории микроанализа ИНЭОС, показал наличие водорода в количестве 0,39%. В литературе [3] приведены данные о растворимости водорода в зависимости от температуры t^0 (рис. 5).

При температуре 500 °С растворимость водорода в железе составляет 0,6%, при температуре 700 °С растворимость повышается до 1,8%, а при температурах 800–900 °С – соответственно до 3,0–4,7% [3]. Даже при низких температурах происходит перераспределение водорода и скопление его в местах высоких локальных напряжений – там, где есть дефекты кристаллической решетки, на границах зерен, в местах неметаллических вклю-

чений. Установленным является факт повышения растворимости водорода с увеличением дефектности металла.

Основываясь на проведенных выше теоретических исследованиях, с учетом графика на рис. 5 следует предположить, что рекомендуемая температура в зоне контакта колеса с рельсом может быть в пределах 300 °С. Основанием для подобного вывода может служить тот факт, что скорость перемещения карьерного локомотивосостава достаточно низкая (в среднем, порядка 15 км/ч), но углы подъема рельсового пути достигают до 60‰. Поэтому, для подтверждения предположения о рекомендуемой величине температуры в зоне контакта колеса с рельсом целесообразно выполнить анализ по другим эксплуатационным параметрам, например, по критерию интенсивности износа в зависимости от температуры в зоне контакта.

Выполненный анализ позволяет построить предположение, что одной из причин низкого содержания углерода в составе дисперсных загрязнений с рельсовых путей Бородинского разреза является водородное обезуглероживание поверхностей рельсов, вследствие чего поверхности трения колес и рельсов могут существенно изменить свои физикомеханические свойства. Поэтому для сведения к минимуму возможности водородного изнашивания необходимо исключить условия его возникновения: принять меры для понижения контактных напряжений зоны взаимодействия системы колесо – рельс и контролировать проскальзывание колес локомотива.

Это вполне можно реализовать, обеспечив конформный контакт системы колесо – рельс.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Анализ состава поверхностных загрязнений рельсов показал, что основную массу слоя загрязнений, раз-

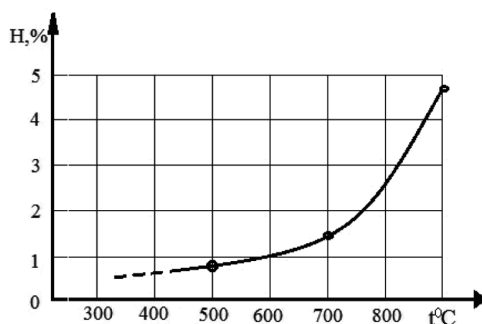


Рис. 5. Зависимость растворимости водорода в железе от температуры

деляющих колесо с рельсом, составляют соединения железа и кремния. В значительно меньших количествах в нем содержатся углерод, сера, окислы алюминия, кальция и магния. Также обнаружено присутствие водорода, входящего в поверхностные слои взаимодействующих тел.

2. В поверхностных загрязнениях карьерных рельсов имеется большее содержание железа и его соединений, а также соединений кремния, чем на участках железнодорожных путей транспорта общего пользования, что свидетельствует о более напряженных условиях эксплуатации железнодорожного транспорта в условиях карьеров.

3. Наличие водорода и пониженное содержание углерода во взятых пробах с поверхностей карьерных рельсов указывает на водородное изнашивание взаимодействующих поверхностей в результате их возможного обезуглероживания.

4. Условия работы локомотивов на карьерах открытых разработок в корне отличаются от условий железнодорожного транспорта общего пользования. В связи с этим для обеспечения экономичных режимов эксплуатации карьерных локомотивов необходимо ограничить температуру в зоне контакта системы колесо – рельс в пределах 300 градусов за счет снижения скорости проскальзывания и уменьшить

контактные напряжения путем обес-
печения конформного контакта коле-
са с рельсом. Для реализации данных
условий необходима организация на

карьерах непрерывного мониторинга
рабочей поверхности головки рельсов
железнодорожного полотна и колес-
ных пар подвижного состава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Косиков С.И. Фрикционные свойства
железнодорожных рельсов. – М.: Наука,
1967. – 112 с.

2. Лужнов Ю.М. Исследование трения за-
пыленных твердых тел. Дисс. на соиск. уч. ст.
канд. физ.-мат. наук. – М.: ИФХ АН СССР,
1966.

3. Лужнов Ю.М. Нанотрибология сцепле-
ния колес с рельсами. Реальность и возмож-
ности. – М.: Интекст, 2009. – 176 с.

4. Основы трибологии (трение, износ,
смазка). Учебник для техн. вузов / Под ред.
А.В. Чичинадзе. – М.: Центр «Наука и техни-
ка», 1995. – 778 с.

5. Осташ О.П. Исследование кинетики
низкотемпературного усталостного разру-
шения сталей и алюминиевых сплавов. Ав-
тореф. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. –
Киев, 1978.

6. Иванова В.С. Усталость металлов. –
М.: Наука, 1971.

7. Крагельский И.В., Добычин М.Н.,
Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и
износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 528 с.

8. Демкин Н.Б. Контактное взаимодействие шеро-
ховатых поверхностей. – М.: Наука, 1970. –
227 с.

9. Ларин Т.В. Исследование механизма
износа, усталостного выкрашивания, образо-
вания выщербин и наволакивания на поверх-
ности катания цельнокатаных колес // Труды
ВНИИЖТ. – 1977. – Вып. 581. – С. 51–68.

10. Рудицын М.И. и др. Справочное
пособие по сопротивлению материалов. –
Минск: Высшая школа, 1970. – 516 с.

11. Гаркунов Д.Н., Мельников Э.Л., Гав-
рилюк В.С. Триботехника. Учеб. пособие. –
М.: КНОРУС, 2011. – С. 386–387.

12. Лужнов Ю.М. и др. Методика и анали-
тические исследования состава поверхност-
ных загрязнений рельсов / Физико-химиче-
ская механика сцепления. Труды МИИТа. –
1973. – Вып. 445. – С. 25–32.

13. Лужнов Ю.М. и др. Рентгеноструктур-
ные исследования состава поверхностных за-

грязнений железнодорожных рельсов / Фи-
зико-химическая механика сцепления. Труды
МИИТа. – 1973. – Вып. 445. – С. 33–38.

14. Лужнов Ю.М. и др. О механизме
образования слоев загрязнений на поверх-
ностях трения железнодорожных колес и
рельсов / Физико-химическая механика сцеп-
ления. Труды МИИТа. – 1973. – Вып. 445. –
С. 39–46.

15. Письмо ИНЭОС «Элементарный ана-
лиз образцов загрязнений поверхности же-
лезнодорожных рельсов Бородинского раз-
реза СУЭК» от 16.11.11.

16. Протокол испытаний химического со-
става образца загрязнений поверхности же-
лезнодорожных рельсов Бородинского раз-
реза СУЭК (г. Красноярск). Аналитический,
сертификационный и эколого-аналитиче-
ский центр «АНСЕРТЭКО» при Московском
государственном институте стали и сплавов
(МИСиС).

17. Лужнов Ю.М. Сцепление колес с
рельсами. Природа и закономерности. – М.:
ИНТЕКСТ, 2003. – 144 с.

18. Радкевич Я.М., Вержанский А.П. На-
учно педагогическая школа Солода Г.И. и
основные этапы его жизненного пути / Сбор-
ник научных трудов семинара «Современные
технологии в горном машиностроении». – М.:
МГТУ, 2012. – С. 4–19.

19. Гаркунов Д.Н., Суранов Г.И., Хру-
сталева Ю.А. Триботехника. Водородное из-
нашивание деталей машин: учеб. пособие. –
М.: Изд-во МСХА, 2007.

20. Хрусталева Ю.А., Ляхов Б.Ф., Бала-
банов В.И., Мамыкин С.М. Наводорожива-
ние поверхности качения колесной пары // Вестник машиностроения. – 1977. – № 11. –
С. 23–26.

21. Грибанова Л.И., Сарак В.И., Филип-
пов Г.А. Процесс зарождения трещины в ста-
ли при замедленном разрушении в условиях
насыщения водородом / Физика металлов и
металловедение. – 1985. – Т. 59. – Вып. 5. –
С. 996–1004. **PLAB**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Керопян Амбарцум Мкртичевич – кандидат технических наук, доцент,
Шахова Кира Ивановна – кандидат технических наук, профессор,
Вержанский Петр Михайлович – кандидат технических наук, доцент,
МГИ НИТУ «МИСиС», e-mail: ud@msmu.ru.

EFFECTS OF POLLUTION IN THE CONTACT WHEEL CAREER LOCOMOTIVES ON THEIR TRACTION CAPABILITY

Keropyan A.M., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
Shachova K.I., Candidate of Technical Sciences, Professor,
Verzhansky P.M., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
Moscow Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia, e-mail: ud@msmu.ru.

The results of theoretical and experimental studies of hydrogen wear conditions as one of the leading types of wear in the destruction of the interacting surfaces of wheel – rail rolling of quarry railway transport. The influence of dispersion of pollution and temperature in the contact area on the wear process on the surfaces of the friction wheel career locomotives and rails.

Key words: open pit mining, quarry railway, hydrogen wear, the system wheel – rail, disperse pollution, the temperature in the contact zone.

REFERENCES

1. Kosikov S.I. *Friktsionnye svoystva zheleznodorozhnykh rel'sov* (Friction properties of rail-track), Moscow, Nauka, 1967, 112 p.
2. Luzhnov Yu.M. *Issledovanie treniya zapylennykh tverdykh tel* (Analysis of friction of dust-laden solids), Candidate's thesis, Moscow, IFKh AN SSSR, 1966.
3. Luzhnov Yu.M. *Nanotribologiya stsepleniya koles s rel'sami. Real'nost' i vozmozhnosti* (Nanotribology of wheel-rail adhesion. Reality and capabilities), Moscow, Intekst, 2009, 176 p.
4. *Osnovy tribologii (trenie, iznos, smazka)*. Uchebnik dlya tekhn. vuzov. Pod red. A.V. Chichinadze Basic tribology (friction, wear, lubrication). Textbook for technical high schools. Chichinadze A.V. (Ed.), Moscow, Tsentr «Nauka i tekhnika», 1995, 778 p.
5. Ostash O.P. *Issledovanie kinetiki nizkotemperaturnogo ustalostnogo razrusheniya staley i aluminievyykh splavov* (Analysis of low-temperature fatigue failure kinetics in steels and aluminum alloys), Candidate's thesis, Kiev, 1978.
6. Ivanova V.S. *Ustalost' metallov* (Fatigue of metals), Moscow, Nauka, 1971.
7. Kragel'skii I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. *Osnovy raschetov na trenie i iznos* (Basis of calculations of friction and wear), Moscow, Mashinostroenie, 1977, 528 p.
8. Demkin N.B. *Kontaktirovanie sherokhovatykh poverkhnostei* (Contacting of rough surfaces), Moscow, Nauka, 1970, 227 p.
9. Larin T.V. *Trudy VNIIZhT* (Transactions of the Research Institute for Railway Transportation), 1977, issue 581, pp. 51–68.
10. Ruditsyn M.I. *Spravochnoe posobie po soprotivleniyu materialov* (Reference aid on strength of materials), Minsk, Vysheishaya shkola, 1970, 516 p.
11. Garkunov D.N., Mel'nikov E.L., Gavrilyuk V.S. *Tribotekhnika*. Ucheb. posobie (Triboengineering. Educational aid), Moscow, KNORUS, 2011, pp. 386–387.
12. Luzhnov Yu.M. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika stsepleniya*. *Trudy MIITa* (Physicochemical mechanics of adhesion. Proceedings of MIIT), 1973, issue 445, pp. 25–32.
13. Luzhnov Yu.M. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika stsepleniya*. *Trudy MIITa* (Physicochemical mechanics of adhesion. Proceedings of MIIT), 1973, issue 445, pp. 33–38.
14. Luzhnov Yu.M. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika stsepleniya*. *Trudy MIITa* (Physicochemical mechanics of adhesion. Proceedings of MIIT), 1973, issue 445, pp. 39–46.
15. *Pis'mo INEOS «Elementarnyi analiz obratstov zagryaznenii poverkhnosti zheleznodorozhnykh rel'sov Borodinskogo razreza SUEK» ot 16.11.11.*
16. *Protokol ispytaniy khimicheskogo sostava obratzsa zagryaznenii poverkhnosti zheleznodorozhnykh rel'sov Borodinskogo razreza SUEK (g. Krasnoyarsk)*. Analiticheskii, sertifikatsionnyi i ekologo-analiticheskii tsentr «ANSERTEKO» pri Moskovskom gosudarstvennom institute stali i splavov (MISiS).
17. Luzhnov Yu.M. *Stseplenie koles s rel'sami. Priroda i zakonmernosti* (Wheel-rail adhesion. Nature and mechanisms), Moscow, INTEKST, 2003, 144 p.
18. Radkevich Ya.M., Verzhanskii A.P. *Sbornik nauchnykh trudov seminara «Sovremennye tekhnologii v gornom mashinostroenii»* (Proceedings of Workshop on Advanced Technologies in Mining Machine Industry), Moscow, MGGU, 2012, pp. 4–19.
19. Garkunov D.N., Suranov G.I., Khrustalev Yu.A. *Tribotekhnika. Vodородное iznashivanie detalei mashin: ucheb. posobie* (Triboengineering. Hydrogen wear of parts of machines, Educational aid), Moscow, Izd-vo MSKhA, 2007.
20. Khrustalev Yu.A., Lyakhov B.F., Balabanov V.I., Mamykin S.M. *Vestnik mashinostroyeniya*. 1977, no 11, pp. 23–26.
21. Griбанова L.I., Sarak V.I., Filippov G.A. *Fizika metallov i metallovedenie*. 1985, vol. 59, issue 5, pp. 996–1004.