

УДК 621:622.023

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ 76, МОДИФИЦИРОВАННОЙ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫМИ ЧАСТИЦАМИ МИНЕРАЛОВ

©2024 г. А.В. Сказочкин^{1*}, Г.Г. Бондаренко^{2*}, В.Б. Перов^{3*}^{1*}ООО «Криокон», Калуга

E-mail: avskaz@rambler.ru

^{2*}Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва

E-mail: bondarenko_gg@rambler.ru

^{3*}ЗАО «Научно-производственное внедренческое предприятие «Турбокон», Калуга

E-mail: perov@turboconkaluga.ru

Поступила в редакцию 7 декабря 2023 г.

После доработки 24 января 2024 г. принята к публикации 12 февраля 2024 г.

Проведены исследования параметров износа и зависимости коэффициента трения от температуры в диапазоне от комнатной температуры до 110 °С поверхностных слоев образцов рельсовой стали 76, модифицированных по технологии минеральных покрытий, а также сравнительное исследование этих слоев с характеристиками сухого трения слоев, полученных методом лазерной наплавки сплавов разного состава. Представлены результаты испытаний трех видов поверхностных слоев стали, модифицированных ультрадисперсными частицами минералов по технологии минеральных покрытий, на трение металла по металлу без смазочного материала при фиксированной статической нагрузке 32 и 41 Н. Определены некоторые показатели износостойкости и изменения коэффициента трения в зависимости от температуры нагрева поверхности. Зафиксирована стабильность или слабая зависимость коэффициента трения образцов с минеральными покрытиями от температуры в диапазоне от комнатной температуры до 110 °С. Результаты сравнительных испытаний характеристик сухого трения поверхностных слоев показали сопоставимость коэффициентов трения образцов с минеральными покрытиями и образцов с полученными методом лазерной наплавки вольфрам-кобальтовым и железо-никелевым покрытиями. По результатам эксплуатационного испытания крестовины Р-65 с износостойким минеральным покрытием установлено, что за восемь месяцев эксплуатации износ сердечника и усовиков крестовины примерно на 30% меньше, чем износ сердечника и усовиков крестовины без минерального покрытия.

Ключевые слова: модификация поверхности; минеральное покрытие; коэффициент трения; износостойкость; крестовина лазерная наплавка.

Проблема выяснения закономерностей и механизма изменения механических свойств стали в поверхностной области железнодорожных рельсов, подвергаемых в условиях эксплуатации действию интенсивных деформаций при изменении температуры в широком диапазоне представляет большой исследовательский интерес. Практическая сторона результатов исследований связана с обеспечением надежной работы рельсов, прогнозированием ресурса рельсов и поиском его увеличения в процессе эксплуатации в обычных и экстремальных условиях. В течение нескольких последних десятилетий проведены многочисленные фундаментальные и прикладные исследования по выяснению эволю-

ции состояния металла в поверхностных слоях рельсов в условиях периодических пластических деформаций и изменения температуры, приводящих к ухудшению физических и механических свойств материала рельсов и необходимости их изъятия для замены [1—6].

Основная концепция деградации рельсового полотна традиционно связывается с образованием и эволюцией дефектов, снижающих прочность деталей и конструкций, испытывающих механическую нагрузку [1—3]. Концепция основана на исследованиях физической природы накопления дефектов и эволюции структурно-фазовых состояний поверхностных слоев рельсов при длительной эксплуатации [7]. На большом экспери-

ментальном материале показано, что в процессе эксплуатации рельсов в поверхностном подслое образуется большое количество микротрещин, микропор и выбоин [1, 2, 4, 8], а также, что эксплуатация рельсов сопровождается преобразованием дислокационной субструктуры [3].

Дополнительно можно отметить, что в результате пропущенного тоннажа 500 млн. т брутто при эксплуатации рельсов выявлены следующие показатели эволюции состояния структурных составляющих рельсов: в 1,5—2 раза повышенная плотность дислокаций, расположенных в объеме ферритной составляющей материала; зафиксированы фрагментация и разрушение цементита пластинчатой морфологии; отмечено формирование наноразмерных частиц карбидной фазы [4, 8]. При этом особо необходимо выделить то, что в поверхностном слое структура железнодорожных рельсов при эксплуатации изменяется наиболее существенно [2, 4]. Происходящие преобразования сопровождаются формированием в объеме рельса внутренних полей напряжений [9], а параметры дефектной субструктуры металла рельсов зависят от расстояния до рабочей поверхности рельсов и от величины пропущенного тоннажа [1—3]. Одним из итогов исследований является вывод, что при дальнейшем увеличении эксплуатации, с одной стороны, происходит увеличение твердости поверхностного слоя рельсовой стали, с другой, возрастает количество дефектов [2]. Существует некоторая критическая величина плотности дислокаций, выше которой при деформации процесс упрочнения переходит в процесс разупрочнения [4]. Поэтому основным видом повреждаемости рельсов в процессе эксплуатации являются дефекты контактно-усталостного характера, происхождение которых связано не с низкой чистотой стали по неметаллическим включениям, а с развитием процессов деструкции поверхностного слоя металла головки рельса (верхний элемент рельса) [2, 4]. Это соответствует развиваемой в последние десятилетия структурно-энергетической теории трения и изнашивания в условиях контактного нагружения [7].

Этапы изменений в поверхностном слое металла головки рельса в зоне контакта с колесом подвижного состава выделили авторы работы [4]: образование наклепанного слоя; образование трещин при деформации

уже наклепанного упрочненного слоя с пониженными характеристиками пластичности; развитие трещин, образование небольших выкрашиваний (питтингов) и последующее их развитие.

Необходимо подчеркнуть, что при наличии агрессивных сред, повышенных/пониженных температур и действия других физических и химических факторов снижения прочности поверхности сопротивление изнашиванию зависит в том числе от коррозионной стойкости материала, его теплостойкости и других свойств. В частности, термическая усталость является следствием деформаций, которые возникают при резкой смене температуры и большом диапазоне ее изменения. Повышение долговечности при термоусталости достигается применением материалов с низким температурным коэффициентом линейного расширения и высокой теплопроводностью [7, 10]. Например, в работе [11] моделирование остаточных напряжений в рельсах типа Р65 (рельсы для укладки ширококолейных железных дорог и производства стрелочных переводов) и исследование их зависимости от температуры эксплуатации показало, что при колебании температур от 0 до 60 °С напряжения меняются в диапазоне от 0 до 25 МПа. В целом проблема изменения трибологических параметров пары металл—металл при изменении температуры обусловлена способностью к механически и термически активируемому схватыванию (адгезионному взаимодействию) [6, 10].

Эволюция состояния металла поверхности рельсов в условиях циклических деформаций, экстремального для рельсового оборудования изменения температуры, наличия осадков и разнообразного абразива (особенно песка) исследована слабо по причине сложности процессов формирования структурно-фазовых состояний, приводящих к ухудшению физических и механических свойств рельсов и последующему изъятию их из эксплуатации.

На практике уменьшение скорости изнашивания достигается повышением твердости поверхностного слоя рельсов специальным легированием с образованием карбидов, поверхностной пластической деформацией, термической обработкой с целью образования мартенсита, частиц карбидов, а также применением химико-термической обработки [7]. Обработку поверхности (шлифование

и фрезерование [4, 12]) проводят также для улучшения трещиностойкости, чтобы устранить нарушения сплошности, царапины, коррозионные пятна и снять неблагоприятные остаточные напряжения [9].

Результатом отечественных исследований и инновационных разработок являются улучшенные эксплуатационные свойства термоупрочненных рельсов, созданных для высокоскоростных магистралей и для эксплуатации при тяжеловесном движении, на горно-перевальных участках пути с кривыми малых радиусов [13]. Улучшение качественных характеристик также демонстрируют рельсы из особых видов стали после изотермической термообработки (например [14]).

Тем не менее, к сожалению, в ряде случаев даже после планового дефектоскопического и технического контроля объектов происходили разрушения рельсов, аварии и крушения [4], поэтому актуальность развития методов контроля за состоянием рельсов, способов повышения их ресурса несомненна. Особо можно выделить проблему повышения ресурса частей крестовины стрелочного перевода¹ — сердечника и усовиков, которые помимо обычных нагрузок испытывают еще и ударную нагрузку при переезде колес локомотивов и вагонов с одной рельсовой нити на другую.

Оценка практической пользы от создания на поверхности рельса пленок или слоев традиционно заключается в определении степени защиты от воздействия внешней среды (термоциклические нагрузки, абразив, вода, кислоты, щелочи и др.) и характеризуется совокупностью свойств и измеряемых параметров (твердость, коэффициент трения, стойкость к коррозии, износостойкость и др.) [15]. Потенциально одной из технологий, обеспечивающих повышение ресурса имеющих относительно небольшие геометрические размеры сердечников и усовиков, является так называемая технология минеральных покрытий [16, 17]. В этой технологии используют

ся ультрадисперсные (размер частиц 0,5—5 мкм) порошки минералов природного происхождения или других веществ для формирования на деталях поверхностных слоев, обладающих высокими антифрикционными, антикоррозионными и другими специальными свойствами [18—20]. Суть технологии заключается в создании модифицированного поверхностного слоя толщиной 5—30 мкм в ходе его пластического деформирования под ультразвуковым и механическим воздействием для активации введения ультрадисперсных частиц минералов в объем металла [17]. При практическом использовании технологии минеральных покрытий в последние пять лет обозначилась ниша с конкурентоспособными результатами по техническим параметрам и экономическим затратам. Это детали и механизмы, работающие в агрессивных средах абразивных частиц, при термоциклических нагрузках в широком температурном диапазоне, морской воде, слабых растворах кислот и в среде некоторых газов [15—20].

Нагрев металлических деталей из-за трения или воздействия окружающей среды может приводить к изменению некоторых трибологических параметров, в том числе износостойкости и коэффициента трения [6, 10, 21]. Изменение параметров может быть вызвано деструктивными процессами на поверхности и в объеме металлической детали, что влияет на ее износостойкость, срок и стабильность работы [22]. Нагрев и последующее ускорение процесса изнашивания, например деталей железнодорожной техники или подъездных путей, особенно при больших нагрузках, в том числе ударных, при наличии естественного абразива из частиц песка, осадков и климатических температурных перепадов, — типичные условия при эксплуатации рельсов, узлов и механизмов путевого хозяйства. Поэтому стабилизация триботехнических параметров деталей в широком температурном диапазоне является отдельной сложной и многофакторной задачей.

Настоящая работа проведена с целью исследования некоторых параметров износа и зависимости коэффициента трения от температуры в диапазоне от комнатной температуры до 110 °С в поверхностных слоях рельсовой стали 76, модифицированных по технологии минеральных покрытий, а также сравнительного исследования этих слоев

¹Крестовина — деталь стрелочного перевода, предназначенная для пересечения транспортом рельсовых нитей под определенным углом (в данном случае без подвижных частей): см. далее фиг. 3. В ее составе: сердечник — основная часть крестовины, выполненная в виде треугольника, обеспечивает прохождение колес поезда; усовик — часть крестовины, предназначенная для предохранения колеса подвижного состава от схода с рельсовой колеи.

и слоев, полученных методом лазерной наплавки сплавов разного состава. Результаты настоящего исследования, а также результаты ранее проведенных экспериментов [15—17, 20, 23] позволили провести эксплуатационные испытания детали железнодорожной техники (крестовины Р65 — детали стрелочного перевода, предназначенной для пересечения транспортом рельсовых нитей под определенным углом без подвижных частей) с минеральным покрытием в экстремальных условиях эксплуатации железнодорожных путей.

Материалы и методика эксперимента. Исследования проводили на цилиндрических образцах диаметром 10 и длиной 20 мм, выполненных токарной обработкой стандартных заготовок из стали 76, широко используемой для изготовления железнодорожных рельсов и стрелочных переводов путей. На торцевой поверхности исследуемых образцов созданы слои (покрытия) трех видов, модифицированных ультрадисперсными частицами минералов, различающихся составом минеральных смесей, по технологии НПО «Геоэнергетика» [15—17]. Использовали смеси на основе кварца и минералов группы серпентина [16]. Покрытия 1—3 различались содержанием добавленной примеси карбида вольфрама. Слои (покрытия) каждого вида были созданы на поверхности двух образцов для последовательного исследования при двух величинах статической нагрузки (32 и 41 Н). Перед началом испытаний контактная поверхность образцов подверглась приработке для достижения полного прилегания поверхности образцов к поверхности стального диска в условиях, идентичных условиям испытаний. Ответная поверхность стального диска была изготовлена из набора листов углеродистой качественной стали 20 толщиной 2 мм. В табл. 1 приведены химические составы стали 76 и стали 20.

Комплексное воздействие на поверхность, осуществляемое при реализации технологии

минеральных покрытий, в совокупности уменьшает недостатки отдельных технологических операций при их последовательном проведении [24]. В частности, напрессовка приводит к увеличению плотности дефектов в поверхностных слоях; создаваемые сжимающие напряжения тормозят развитие поверхностных трещин [16, 17, 24]. Образующиеся и имеющиеся поверхностные дефекты заполняются частицами минералов [23]. В результате такой «холодной» обработки создается тонкий слой, содержащий минеральные частицы, концентрирующиеся в имеющихся и/или предварительно созданных микрополостях [16]. В итоге в поверхностном слое образца из металла образуется модифицированный слой, обладающий высокой твердостью и износостойкостью [16, 17, 20]. Уже отмечена особая роль микротрещин, образующихся в поверхностном слое рельсов в процессах разрушения материала при изнашивании и деформации [1, 4]. В результате внедрения в поверхностный слой ультрадисперсных частиц минералов и заполнения ими дефектов поверхности возможны блокирование процессов развития дислокаций в макротрещины и торможение процесса поверхностного изнашивания. Отчасти поэтому для модификации поверхности образцов для исследования и затем деталей крестовин рельсов была использована технология минеральных покрытий.

Суть испытаний поверхностных слоев на трение металла по металлу без смазочного материала состоит в том, что поверхность исследуемого образца взаимодействует в течение заданного времени при фиксированной статической нагрузке со стальной металлической поверхностью [21, 22, 25]. В процессе испытаний фиксируется разогрев контактных поверхностных слоев и измеряется коэффициент трения. До и после окончания каждого цикла испытаний исследуемый образец взвешивается и определяется износостойкость поверхностного слоя. Визуальным

Таблица 1

Химические составы стали 76 (ГОСТ 24182—80) и стали 20 (ГОСТ 1050—2013)

Марка	Содержание элемента, мас. %									
	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Cu	As	Fe
Сталь 76	0,71—0,82	0,18—0,4	0,75—1,05	До 0,045	До 0,035	—	—	—	—	Ост.
Сталь 20	0,17—0,24	0,17—0,37	0,35—0,65	До 0,035	До 0,03	До 0,30	До 0,25	До 0,30	До 0,08	Ост.

осмотром контактных поверхностей оценивается наличие признаков развития процессов схватывания.

В процессе испытаний под действием статической нагрузки (32 и 41 Н) регистрировали температуру разогрева поверхности испытываемого образца в зоне контакта со стальным диском с помощью термопары, размещенной в основании образца на расстоянии 1 мм от поверхности модифицированного слоя. С помощью тензометрического устройства регистрировалась сила трения, по которой вычисляли коэффициент трения. Для определения износа исследуемый образец взвешивали до и после испытаний, использовали электронные аналитические весы с ценой деления не менее 0,001 г.

По результатам измерения потери массы образцов определялись такие показатели износостойкости, как износ (мг), средняя скорость изнашивания (мг/с), средняя интенсивность изнашивания (мг/м).

Для исследования образцов на трение металла по металлу использовали: экспериментальную установку для испытаний на трение металла по металлу с асинхронным электродвигателем переменного тока мощностью 3,0 кВт, механической частью с ременной передачей и набором сменных дисков для регулировки скорости вращения, системой нагружения образцов, состоящей из нагружающего штока с гнездом для крепления оправки и штока для создания прижимной нагрузки с помощью грузов; двухканальный USB PC осциллограф PCSU1000 с выводом на компьютер; электронные весы

HTR-120CT с датчиком Tuning Fork акустического типа, диапазоном взвешивания от 0,01 до 120 г при дискретности не более 0,0001 г, ценой поверочного деления не менее 0,001 г и классом точности по ГОСТ 24104—2001 специальный (I).

По результатам испытаний построены графики изменения температуры разогрева поверхности трения и коэффициента трения в зависимости от длительности испытания.

Результаты исследований и их обсуждение. В табл. 2 приведены результаты испытаний поверхностных слоев, модифицированных ультрадисперсными частицами минералов (покрытие 1). Условия эксперимента: номинальная площадь контактной поверхности образца — 314 мм²; нагрузка — 32 и 41 Н; линейная скорость перемещения образца — 15,7 м/с; длительность одного цикла испытаний — 120 с.

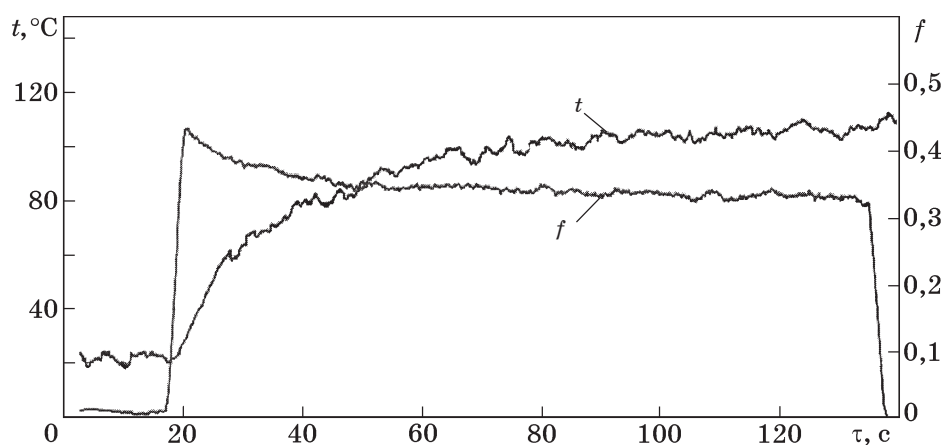
Результаты измерения температуры в поверхностном слое с покрытием 1 и коэффициента трения в зоне контакта представлены на фиг. 1. Период приработки для этого специального образца практически отсутствовал. В начальный момент времени наблюдалось пиковое значение коэффициента трения f , затем последовала стабилизация его значения на уровне 0,35—0,36 ед.

Изменение коэффициента трения образца с покрытием 1 при нагрузке 41 Н в процессе эксперимента в течение времени τ было аналогичным. Разогрев поверхностного слоя при нагрузке 41 Н приводил к плавному повышению его температуры по мере увеличения длительности испытаний τ . При нагрузке

Таблица 2

Результаты испытаний образца с покрытием 1 на изнашивание при трении поверхностных слоев металла по металлу без смазочного материала

Показатель	Нагрузка при испытании	
	32 Н	41 Н
Начальная масса, г	30,4808	30,4471
Конечная масса, г	30,4471	30,3803
Износ, мг	33,7	66,8
Длительность испытания, с	120	120
Путь трения, м	1884	1884
Средняя скорость изнашивания, мг/с	0,2808	0,5567
Средняя интенсивность изнашивания, мг/м	0,0179	0,0354



Фиг. 1. Изменение температуры в поверхностном слое образца с покрытием 1 и его коэффициента трения в процессе испытания на изнашивание при нагрузке 32 Н

ке 41 Н во второй половине цикла испытаний значение коэффициента трения стабилизировалось на уровне 0,33—0,34 при температуре около 100 °С и выше. Внешний вид поверхностей трения после проведения испытаний характеризуется сглаженным рельефом, сохраняющим следы царапин небольшой глубины. Поверхность ответного стального диска имела более выраженные следы царапин в сочетании с участками переноса на нее материала поверхностного слоя покрытия.

Результаты испытаний поверхностных слоев образца с покрытием 2 представлены в табл. 3. Условия эксперимента с образцом, модифицированным ультрадисперсными частицами минералов, были такими же, как и при испытании образца с покрытием 1.

Результаты измерения температуры в поверхностном слое (покрытие 2) и коэффициента трения в зоне контакта представлены на фиг. 2.

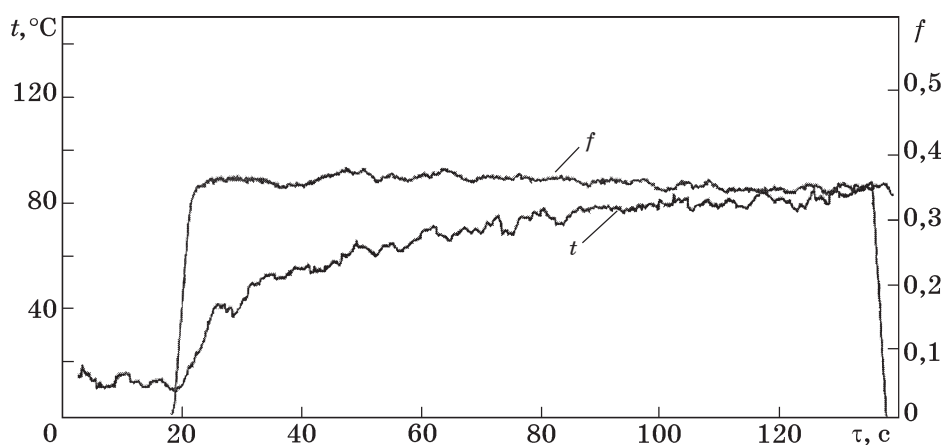
При нагрузке 32 Н коэффициент трения образца с покрытием 2 стабилен с начального момента и до конца цикла испытаний и находится на уровне 0,35 ед. При нагрузке 41 Н в начальный момент времени наблюдается пиковое значение коэффициента f , но затем следует его стабилизация на уровне 0,34—0,35 ед. Разогрев поверхностного слоя при обеих нагрузках плавно усиливается по мере увеличения длительности испытаний. По окончании испытаний оказалось, что поверхность покрытия изношена не сильно, остались следы первоначального ее рельефа. При этом поверхность ответного стального диска имеет следы царапин, параллельных направлению движения при испытании на изнашивание; также наблюдались слабые следы схватывания и вырывания металла диска.

Результаты испытаний поверхностных слоев образца с покрытием 3, модифициро-

Таблица 3

Результаты испытаний образца с покрытием 2 на изнашивание при трении поверхностных слоев металла по металлу без смазочного материала

Показатель	Нагрузка при испытании	
	32 Н	41 Н
Начальная масса, г	30,2270	30,2072
Конечная масса, г	30,2072	30,1634
Износ, мг	19,8	43,8
Длительность испытания, с	120	120
Путь трения, м	1884	1884
Средняя скорость изнашивания, мг/с	0,1650	0,3650
Средняя интенсивность изнашивания, мг/м	0,0105	0,0232



Фиг. 2. Изменение температуры в поверхностном слое образца с покрытием 2 и его коэффициента трения в процессе испытания на изнашивание при нагрузке 32 Н

ванного ультрадисперсными частицами минералов, представлены в табл. 4. Условия эксперимента были такими же, как и при испытании образцов с покрытиями 1 и 2.

Образец с покрытием 3 характеризовался постепенным плавным снижением коэффициента трения с 0,42—0,43 до 0,35—0,36 при нагрузках как 31, так и 41 Н. Поверхность образца с покрытием 3 оказалась равномерно изношенной без формирования выраженного рельефа. На поверхности стального диска наблюдались глубокие царапины с местными задирами и заусенцами.

Весьма интересна для практического применения стабильность (покрытия 1 и 2) или слабая зависимость (покрытие 3) коэффициента трения от температуры. Традиционно стабилизацию коэффициента трения связывают с состоянием оксидных пленок на поверхности металла. Возможно, что в случае создания минеральных слоев стабильное по-

ведение коэффициента трения при повышении температуры связано с этой же причиной. Здесь роль пленки выполняет стойкий к изменению температуры слой, модифицированный минералами. Не исключен дополнительный эффект от заполнения ультрадисперсными частицами микротрещин и дефектов, а также от изменений, происходящих с дефектами при трении под нагрузкой, которые оказывают решающее воздействие на поведение дефектов в поверхностно упрочненном слое и влияют на стабилизацию трибологических параметров, в частности коэффициента трения, при работе деталей. Эти предположения требуют дальнейших исследований дефектов в поверхностном слое, упрочненном по технологии минеральных покрытий.

Дополнительно, для характеристики технологической ниши покрытий, создаваемых ультрадисперсными порошками минералов,

Таблица 4

Результаты испытаний образца с покрытием 3 на изнашивание при трении поверхностных слоев металла по металлу без смазочного материала

Показатель	Нагрузка при испытании	
	32 Н	41 Н
Начальная масса, г	30,1970	30,1686
Конечная масса, г	30,1686	30,1174
Износ, мг	28,4	51,2
Длительность испытания, с	120	120
Путь трения, м	1884	1884
Средняя скорость изнашивания, мг/с	0,2367	0,4267
Средняя интенсивность изнашивания, мг/м	0,0150	0,0272

Результаты испытаний образцов с покрытиями разного состава

Образец	Коэффициент трения при нагрузке на образец	
	32 Н	41 Н
С минеральным покрытием:		
1	0,40—0,32	0,40—0,35
2	0,35—0,33	0,45—0,35
3	0,44—0,36	0,42—0,36
С покрытием из стали:		
мартенситной нержавеющей SS 410L [28]	0,50—0,40	0,50—0,45
аустенитной нержавеющей AISI 316L [29]	0,55—0,45	0,55—0,45
инструментальной M2 [30]	0,40—0,36	0,42—0,36
С покрытием из сплава:		
вольфрам-кобальтового ВК-6 [31]	0,45—0,32	0,40—0,32
железо-никелевого ХН32Т [32]	0,45—0,35	0,42—0,38
С покрытием из оловянистой бронзы		
БрОФ8,0-0,3 [33]	0,55—0,40	0,55—0,50

были выполнены сравнительные исследования характеристик сухого трения поверхностных слоев, полученных методом лазерной наплавки сплавов разного состава по технологиям, описанным в работах [26, 27]. Результаты представлены в табл. 5. Эти данные дополняют результаты, полученные нами в работе [15], в которой выполнено сравнительное исследование поверхности образцов из стали 20Х13, модифицированной ультрадисперсными частицами смесей разных минералов, в условиях абразивного изнашивания при трении о закрепленные частицы под действием статической нагрузки 60 и 160 Н. Тогда лучший из образцов продемонстрировал стойкость к изнашиваемому абразивному воздействию, сопоставимую со стойкостью покрытия из кобальтового сплава, созданного методом лазерной наплавки, но уступающую стойкости покрытий: из никелевого сплава, созданного методом лазерной наплавки, и из инструментальной стали.

Из табл. 5 следует, что коэффициент трения образцов с минеральными покрытиями на момент окончания испытаний сопоставим с данной характеристикой для образцов с вольфрам-кобальтовым и железо-никелевым покрытием. Увеличение нагрузки с 32 до 41 Н (несколько менее, чем на 30%) практически не оказывает влияния на этот показатель.

Полученные результаты, а также результаты экспериментов, выполненных нами ранее [15—17, 20], явились основанием для проведения эксплуатационного испытания крестовины

Р-65 с износостойким минеральным покрытием 2, отличающимся оптимальным содержанием добавляемой примеси карбида вольфрама и продемонстрировавшим сравнительно меньшую среднюю скорость и интенсивность изнашивания, а также стабильность значения коэффициента трения в условиях повышения температуры. Крестовина (фиг. 3) с минеральным покрытием была уложена на железнодорожный путь между станцией «Доменная» города Темиртау (Казахстан) и шлаковым отвалом. В результате получено, что за 8 мес эксплуатации износ сердечника и усовиков примерно



Фиг. 3. Фотография крестовины в экспериментальном цехе после создания покрытия

на 30% меньше износа сердечника и усовиков крестовины без минерального покрытия. Возможный экономический эффект будет определяться в том числе и масштабом применения технологии минеральных покрытий.

Выводы. 1. По результатам испытаний трех видов поверхностных слоев, созданных на образцах рельсовой стали 76, модифицированных ультрадисперсными частицами минералов, на трение с ответной стальной металлической поверхностью без смазочного материала при фиксированной статической нагрузке 32 и 41 Н определены показатели износостойкости (средняя скорость изнашивания и средняя интенсивность изнашивания) и изменения коэффициента трения в зависимости от температуры разогрева поверхности образцов. Выделено покрытие 2, которое отличается оптимальным содержанием добавляемой примеси карбида вольфрама. Оно продемонстрировало сравнительно меньшую среднюю скорость и интенсивность изнашивания.

2. Отмечены стабильность (покрытия 1 и 2) или слабая зависимость (покрытие 3) коэффициента трения от температуры в диапазоне от комнатной температуры до 110 °С. Сделано предположение, что стабильность коэффициента трения связана со стойкостью слоя, модифицированного минеральными частицами, и состоянием (стабилизацией) дефектов в поверхностном слое, вызванным заполнением дефектов частицами минералов.

3. По результатам сравнительных испытаний характеристик сухого трения поверхностных слоев, полученных методом лазерной наплавки сплавов разного состава, определено, что коэффициент трения образцов с минеральными покрытиями на момент окончания испытаний сопоставим с данной характеристикой для образцов с вольфрам-кобальтовым и железо-никелевым покрытиями.

4. По результатам эксплуатационного испытания крестовины Р-65 с износостойким минеральным покрытием определено, что за 8 мес эксплуатации износ сердечника и усовиков примерно на 30% меньше, чем у сердечника и усовиков крестовины без минерального покрытия. Возможный экономический эффект будет зависеть в том числе и от масштаба применения технологии минеральных покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шур, Е.А. Повреждения рельсов / Е.А. Шур. — М. : Интекст, 2012. 192 с.
2. Громов, В.Е. Изменение структуры и свойств поверхностных слоев головки рельсов после длительной эксплуатации / В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, К.В. Морозов, О.А. Перегудов, К.В. Алсараева, Н.А. Попова, Е.Л. Никоненко // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2015. Т.12. №2. С.203—208.
3. Громов, В.Е. Природа упрочнения поверхности рельсов в процессе длительной эксплуатации / В.Е. Громов, А.М. Глезер, Ю.Ф. Иванов, А.Б. Юрьев // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2016. Т.13. №2. С.217—222.
4. Шур, Е.А. Эволюция повреждения рельсов дефектами контактной усталости / Е.А. Шур, А.И. Борц, А.В. Сухов, А.Ю. Абдурашитов, Л.В. Базанова, К.Л. Заграничек // Вестн. Научно-исследовательского ин-та железнодорожного транспорта (Вестн. ВНИИЖТ). 2015. №3. С.3—9.
5. Токмакова, Е.Н. Разработка рельсов новой категории для применения в особо тяжелых условиях эксплуатации / Е.Н. Токмакова, И.Е. Перков, П.В. Иванов, К.Л. Заграничек // Вестн. ВНИИЖТ. 2022. Т.81. №4. С.339—346. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2022-81-4-339-346>.
6. Семенов, А.П. Трибологические свойства металлов, металлоподобных соединений и композиционных материалов при высоких температурах / А.П. Семенов // Трение и износ. 2007. Т.28. №4. С.426—435.
7. Бараз, В.Р. Физические основы упрочнения и разрушения материалов : учеб. пособие / В.Р. Бараз, М.А. Филиппов. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та. 2017. 192 с.
8. Peregudov, O.A. Formation of internal stress fields in rails during long-term operation / O.A. Peregudov, K.V. Morozov, V.E. Gromov, A.M. Glezer, Yu.F. Ivanov // Russian Metallurgy (Metally). 2016. №4. P.371—374. <https://doi.org/10.1134/S0036029516040182>.
9. Муравьев, В.В. Оценка остаточных напряжений в рельсах с использованием электромагнито-акустического способа ввода-приема волн / В.В. Муравьев, Л.В. Волкова, В.Е. Громов, А.М. Глезер // Деформация и разрушение материалов. 2015. №12. С.34—37.
10. Бондаренко, Г.Г. Основы материаловедения : учебник / Г.Г. Бондаренко, Т.А. Кабанова, В.В. Рыбалко ; под ред. Г.Г. Бондаренко. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний. 2014. 760 с.
11. Gromov, V.E. Degradation of structure and properties of rail surface layer at long-term operation / V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov, R.S. Qin, O.A. Peregudov, K.V. Aksenova, O.A. Semina // Mater. Sci. Technol. 2017. V.33. №12. P.1473—1478. <https://doi.org/10.1080/02670836.2017.1287983>.
12. Шур, Е.А. Энциклопедия знаний о дефектах рельсов : рецензия на книгу К.-О. Эделя, Г. Будницкого, Т. Шнитцера «Дефекты рельсов. Напряжения и повреждения». Т.1 / Е.А. Шур // Вестн. ВНИИЖТ. 2021. Т.80. №3. С.182—185. DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-3-182-185>.
13. Качество отечественных рельсов превосходит зарубежные аналоги, 2019.11.11. [Сайт]. URL: <https://rg.ru/2019/11/11/kachestvo-otchestvennyh-relov>

- prevoshodit-zarubezhnye-analogi.html (дата обращения 28.11.2023).
14. Радкевич, М.М. Формирование структуры сталей при программной механико-термической обработке / М.М. Радкевич // Современное машиностроение. Наука и образование. 2014. №4. С.1199—1204.
 15. Skazochkin, A.V. Abrasive wear of metal surface modified with mineral particles / A.V. Skazochkin // IOP Conf. Ser. : Mater. Sci. Eng. 2020. V.996. Art.012023. DOI : 10.1088/1757-899X/996/1/012023. [Сайт]. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/996/1/012023#references> (дата обращения 01.12.2023).
 16. Кислов, С.В. Эффективные минеральные покрытия для упрочнения поверхности металлических материалов / С.В. Кислов, В.Г. Кислов, А.В. Сказочкин, Г.Г. Бондаренко, А.Н. Тихонов // Металлы. 2015. №4. С.56—63. — (Kislov, S.V. Effective mineral coatings for hardening the surface of metallic materials / S.V. Kislov, V.G. Kislov, A.V. Skazochkin, G.G. Bondarenko, A.N. Tikhonov // «Russian Metallurgy (Metally)», 2015. Is.7. P.558—564. DOI : 10.1134/S0036029515070095).
 17. Skazochkin, A.V. Research of tribological features of steel surface by creating mineral coatings / A.V. Skazochkin, G.G. Bondarenko, S.V. Kislov // J. Eng. Sci. Technol. Rev. 2018. V.11(6). P.138—143. DOI : 10.25103/jestr.116.17.
 18. Khodabakhshi, F. Surface modifications of an aluminum magnesium alloy through reactive stir friction processing with titanium oxide nanoparticles for enhanced sliding wear resistance / F. Khodabakhshi, A. Simchi, A.H. Kokabi // Surface Coating Technol. 2017. №309. P.114—123.
 19. Adebisi, A.A. Metal matrix composite brake rotor : historical development and product life cycle analysis / A.A. Adebisi, M.A. Maleque, Md.M. Rahman // Intern. J. Automotive and Mechan. Eng. 2011. №4. P.471—480.
 20. Kislov, S.V. Wear resistance of a metal surface modified with minerals / S.V. Kislov, V.G. Kislov, P.V. Balasch, A.V. Skazochkin, G.G. Bondarenko, A.N. Tikhonov // IOP Conf. Ser. : Mater. Sci. Eng. 2016. V.110. DOI : 10.1088/1757-899X/110/1/012096. [Сайт]. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/110/1/012096/pdf>.
 21. Panjkovic, V. Friction and the hot rolling of steel / V. Panjkovic. — N.Y. : CRC Press, 2014. 239 p.
 22. Ludema, K.C. Friction, wear, lubrication : A textbook in tribology / K.C. Ludema, L. Ajayi. — N.Y. : CRC Press, 2018. 304 p. DOI : <https://doi.org/10.1201/9780429444715>.
 23. Сказочкин, А.В. Метод локальной маркировки металлической поверхности с помощью ультрадисперсных частиц минералов / А.В. Сказочкин, Г.Г. Бондаренко, П.В. Балаш // Металлы. 2023. №3. С.73—80. — (Skazochkin, A.V. Method for local marking of a metal surface by ultrafine mineral particles / A.V. Skazochkin, G.G. Bondarenko, P.V. Balash // «Russian Metallurgy (Metally)», 2023. Is. 5. P.613—619. <https://doi.org/10.1134/S0036029523050105>. DOI: 10.1134/S0036029523050105).
 24. Зенин, Б.С. Современные технологии поверхностного упрочнения и нанесения покрытий : учеб. пособ.; 2-е изд. / Б.С. Зенин, А.И. Слосман. — Томск : Изд-во Томского политехнического ун-та, 2012. 120 с.
 25. Bhushan, B. Modern tribology handbook : 2 V. / B. Bhushan. — Boca Raton : CRC Press. 2000. 1760 p. DOI : <https://doi.org/10.1201/9780849377877>.
 26. Григорьянц, А.Г. Сравнение эксплуатационных характеристик покрытий из нержавеющей стали аустенитного и мартенситного классов, полученных методом лазерной газопорошковой наплавки / А.Г. Григорьянц, А.И. Мисюров, Р.С. Третьяков, А.Я. Ставертий // Наука и образование. 2012. №6. С.15—24.
 27. Долговечный, А.В. Технологии наплавки легированной стали на основу из углеродистой стали / А.В. Долговечный, Л.А. Демидова, Е.А. Морозов // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2012. Т.14. №1(2). С.550—553.
 28. Мартенситная нержавеющая сталь SS 410 L. [Сайт]. URL : <https://www.hpmetals.com/-/media/ametekhpmetals/files/technical-data/stainless-steel/ss%20410.pdf> (дата обращения 01.12.2023).
 29. Нержавеющая сталь AISI 316L, описание и характеристики. [Сайт]. URL : <https://inoxprime.by/novosti/nerzhaveyushaya-stal-aisi-316l-opisanie-i-harakteristiki/> (дата обращения 01.12.2023).
 30. Инструментальная сталь M2. [Сайт]. URL : <https://ru.shew-esteelpipe.com/special-steel/m2-high-speed-tool-steel.html> (дата обращения 01.12.2023).
 31. Вольфрам-кобальтовый сплав ВК-6. [Сайт]. URL : https://metallichekiy-portal.ru/marki_metallov/wol/WK6 (дата обращения 01.12.2023).
 32. Железо-никелевый сплав ХН32Т. [Сайт]. URL : <https://msk-grupp.ru/list-marka-xh32t/> (дата обращения 01.12.2023).
 33. Оловянистая бронза БрОФ8,0-0,3. [Сайт]. URL : <https://poliasmet.ru/svoystva-bronzyi/olovyanistyye-bronzyi.html> (дата обращения 01.12.2023).