

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.3(92).15939

В. М. БОРОДІЙ, О. О. МІКОСЯНЧИК

*Національний авіаційний університет, Україна***ТРИБОТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИСПЕРСІЙНО
НІТРИДВАНАДІЄВО ЗМІЦНЕНИХ СТАЛЕЙ**

Проведено аналіз антифрикційних, протизношувальних та енергетичних характеристик колісних та рейкових сталей. Встановлений позитивний вплив технології мікролегування сталі ванадієм і азотом на триботехнічні характеристики колісної сталі. Розглянуто процеси структурної пристосованості нітридванадієво зміцненої колісної сталі з позицій механо-фізико-хімічних процесів, які відбуваються з поглинанням енергії поверхневими та приповерхневими шарами металу.

Ключові слова: мікролегування, мікротвердість, питома робота тертя, антифрикційні властивості, зносостійкість.

Вступ та постановка задач дослідження. Однією з основних проблем залізничного транспорту є забезпечення надійності всіх елементів рухомого складу та колії в результаті зростання швидкостей, маси вантажних поїздів, погонного і осьового навантаження вагонів і локомотивів. Найбільш напруженим вузлом тертя є пара «колесо-рейка», оскільки взаємодія цих деталей одночасно відбувається як по поверхнях кочення, так і між гребнем колеса і бічною поверхнею рейки.

Проковзування гребеня колеса відносно внутрішньої поверхні головки рейки при дії спрямовуючої сили призводить до зростання як зовнішніх, так і внутрішніх сил тертя, що неминуче супроводжується зносом контактуючих поверхонь. Інтенсивність зносу («підрізу») гребеня колеса безпосередньо залежить від енергетичних характеристик трибоконтакту, зростання яких призводить до прогресивного розвитку втомного зношування.

Відомий ряд ресурсозберігаючих технологій, спрямованих на зниження енергетичних витрат на тягу поїздів і зносу контактуючих поверхонь. Найбільш опрацьованими і поширеними з них є лубрикація зон контакту колеса з рейкою, поліпшення динамічних якостей рейкових екіпажів, оптимальний вибір співвідношення твердості колеса і рейки, підбір конформних профілів поверхонь кочення колеса і рейки та ін. [1]. Однак, використання цих технологій дозволяє поки лише частково вирішити проблему зниження кінематичного опору. Розробка нових триботехнічних матеріалів для фрикційної системи колесо - рейка є перспективним напрямком при вирішенні питань, пов'язаних з підвищенням надійності залізничного транспорту.

Аналіз останніх публікацій з даної проблеми. Знос коліс й рейок залежить від фізико-механічних процесів, що протікають в області їх контакту. Характер протікання цих процесів та їх інтенсивність в значній мірі залежать від зовнішніх впливів на поверхню контакту, зокрема, від сил взаємодії контактуючих тіл і їх відносних переміщень, які істотно залежать від кутів набігання коліс на рейки [2].

Згідно [3], домінуючими видами зношування гребенів коліс і бічної грані головки є зношування при заїданні, втомне зношування, зношування внаслідок пластичної деформації. В даній роботі встановлено, що інтенсифікація втомного зношування відбувається на фоні процесів, які обумовлюють заїдання поверхонь тертя коліс і рейок. При цьому руйнування пар тертя при циклічних повторних

навантаженнях проявляється при напругах, які можуть бути нижче не тільки межі міцності, а й межі пружності.

Проведений в роботі [4] аналіз основних дефектів рейок свідчить про недостатню зносостійкість та контактну-втомну міцність рейкової сталі, що підтверджується значним боковим зносом робочої поверхні рейки у кривих ділянках колії. За рахунок збільшення потужності локомотивів зросла і сила тяги, яка передається через одну колісну пару. Саме внаслідок цих чинників на поверхні головки рейки концентруються великі дотичні контактні напруження, що перевищують межу текучості металу, в результаті чого починають виникати тріщини та відшарування [5].

Ресурс роботи трибоелементів фрикційної системи колесо – рейка може бути збільшений при реалізації ефективних технологічних рішень, які перешкоджають утворенню фрикційних зв'язків на ділянках фактичного контакту. Зокрема, впровадження технології мікролегування сталі для зазначеної фрикційної системи дозволяє ефективно впливати на структуру металу, його механічні та експлуатаційні властивості.

Для підвищення комплексу експлуатаційних властивостей сталі для високоміцних залізничних коліс в роботі [6] запропоновано склад дослідних сталей зі зниженим вмістом вуглецю і введена система мікролегування алюміній-титан-азот, яка сприяє утворенню дисперсних частинок карбонітридів титану і алюмінію. Розроблена система мікролегування забезпечує отримання сталі з високим рівнем механічних властивостей і підвищеною стійкістю до утворення експлуатаційних дефектів на поверхні кочення.

В Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України розроблена технологія мікролегування сталі ванадієм і азотом [7]. Застосування даної технології сприяє реалізації механізму твердіння, що приводить до підвищення міцності без зниження пластичних і в'язкісних властивостей. Найбільш суттєвою перевагою розроблених сталей є одночасне істотне підвищення їх статичної та циклічної міцності, статичної та циклічної в'язкості руйнування, тепло- і термостійкості, зносостійкості. В роботі [8] проведені комплексні дослідження розроблених сталей і надано рекомендації до використання їх як високоміцнісних рейкових і колісних перлітних сталей з дисперсійним зміцненням нанорозмірними, некогерентними, внутрішньозеренними нітридами ванадію, які перевищують стандартні марки сталей на 100-150 МПа за міцністю, в 2 рази за циклічною тріщиностійкістю, майже в 2 рази за зносостійкістю в умовах ковзання та кочення і зниженням в 2 рази схильністю до утворення крихких поверхневих мартенситних шарів.

Дослідження триботехнічних характеристик даного типу сталей представляє значний інтерес в плані розробки експлуатаційних критеріїв оцінки їх антифрикційних та зносостійких властивостей.

Мета роботи – оцінка антифрикційних, енергетичних, протизношувальних характеристик сталі, мікролегованої ванадієм і азотом.

Методика проведення експерименту.

Дослідження проводяться на програмно-апаратному комплексі (ПАК) для оцінки триботехнічних характеристик трибоелементів [9]. В роботі використані наступні методики визначення триботехнічних характеристик вузла тертя:

- антифрикційні властивості контакту визначаються за кінетикою зміни крутного моменту тертя та подальшим розрахунком коефіцієнту тертя в контакті;
- розрахунок питомої роботи тертя проводять шляхом інтегрування площі, обмеженої кривою моменту тертя, та вибору довільного діапазону інтегрування по осі абсцис за координатою часу напрацювання елементів трибоспряження, по якій визначається кут повороту контактних поверхонь за зафіксованою їх частотою обертання в певний обраний час наробітки, з урахуванням кінетичної енергії обертальних деталей;
- міцнісні характеристики контактних поверхонь металу визначаються за ГОСТ 22162-76 (Метод определения микротвердости);
- протизношувальні властивості мастильних матеріалів визначаються за результатами вимірювання попередньо нанесеної лунки вдавлюванням індентора приладу ПМТ-3 (ГОСТ 27860-88. Детали трущихся сопряжений. Методы измерения износа).

Досліджувані нестационарні умови тертя характеризуються циклічністю проведення експериментів в режимі запуск – стаціонарна робота – гальмування – зупинка. Максимальна частота обертання для випереджаючої поверхні складала 1000 об/хв. В роботі використовувались режими з проковзуванням відстаючої поверхні 3%.

Припрацювання контактних поверхонь здійснювалося до 30 циклу наробітки при контактному навантаженні $\sigma_{\max} = 100$ МПа. Робота контактних поверхонь при подальших 100 циклах напрацювання (з 30-го по 130-й) відбувалась при $\sigma_{\max} = 140$ МПа.

В якості зразків використовували колісні та рейкову сталі, хімічний склад яких наведено в табл. 1 та 2. Досліджувані марки сталей розроблені в Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України.

Таблиця 1

Елементний склад досліджуваних колісних сталей

Марка сталі	Масова частка елементів, % (решта – Fe)									
	C	Si	Mn	V	N	Cr	S	P	Al	VN, 10^{-4}
Зразок 1: колісна сталь подібна до сталі за ГОСТ 10791:2006 (Україна)	0,61	0,17	0,56	0,098	0,06	0,18	0,015	0,012	0,06	5,88
Зразок 2: колісна сталь умовної марки КАФ з дисперсійним нітридванадієвим і твердорозчинним зміцненням кремнієм і марганцем	0,51	0,67	0,81	0,17	0,017	0,37	0,025	0,025	0,014	29,75

Таблиця 2

Елементний склад досліджуваної рейкової сталі М76М за ГОСТ 4344:2004

Масова частка елементів, % (решта – Fe)					
C	Si	Mn	Cr	S	P
0,73	0,14	1,03	0,08	0,033	0,054

Термічна обробка досліджуваних сталей:

– колісна сталь: загартовування на мартенсит, високотемпературний відпуск (625 °С);

– рейкова сталь: нормалізація на тонкопластинчастий перліт, твердість HB 390.

Обговорення основних результатів. Для досліджуваних марок колісних сталей встановлені якісні відмінності як в період припрацювання, так і в подальший період напрацювання в нестационарних умовах тертя. В період припрацювання для зразка 1 встановлені більш ефективні антифрикційні властивості, в порівнянні з зразком 2 – коефіцієнт тертя менше в 1,36 раз (рис. 1). Однак, при зростанні контактного навантаження до 140 МПа змінюється характер прояву антифрикційних характеристик досліджуваних зразків. Для зразку 1 коефіцієнт тертя зростає в 1,33 рази, в порівнянні з зразком 2. Після 80-го циклу напрацювання лише для зразку 1 спостерігається схоплювання контактних поверхонь, яке періодично повторюється до 113 циклу напрацювань, після чого зафіксовано заїдання контактних поверхонь, що проявляється в пробуксовуванні дослідного зразку, підвищенні шуму. Однак, стрімкого зростання коефіцієнту тертя в контакті не зафіксовано.

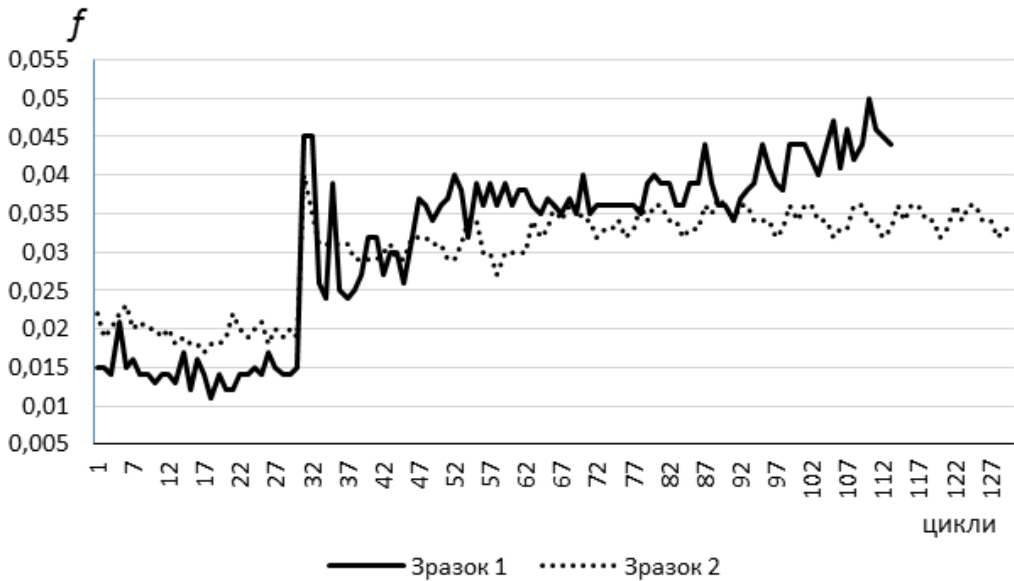


Рис. 1. Кінетика зміни коефіцієнта тертя при напрацюванні в умовах кочення з проковзуванням 3%

Для розкриття механізму зношування досліджуваних сталей проведена оцінка енергетичних властивостей контакту, зокрема питомої роботи тертя (рис. 2). Колісна сталь зразок 1 характеризується нестабільними енергетичними характеристиками – діапазон зміни питомої роботи тертя в фрикційному контакті складає від 1167 до 9412 Дж/мм². Якщо в період припрацювання при контактному навантаженні 100 МПа спостерігається стабілізація даного параметра на рівні 3000 Дж/мм², то при зростанні контактного навантаження до 140 МПа стабілізації питомої роботи тертя не встановлено. Це свідчить про інтенсифікацію пружно-пластичного деформування поверхневих та приповерхневих шарів металу, відсутність структурної пристосованості контактних поверхонь при терті.

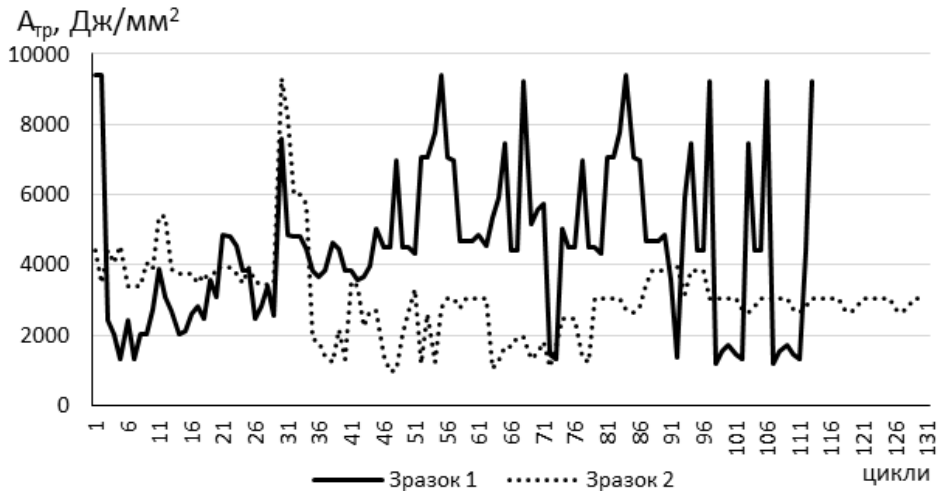


Рис. 2. Зміна питомої роботи тертя для досліджуваних колісних сталей

Для дисперсійно нітридванадієво зміцненої колісної сталі зразку 2 встановлені суттєві відмінності від зразку 1, які полягають в наступному. По-перше, як в період припрацювання, так і в період роботи до 130 циклу спостерігається стабілізація енергетичних характеристик фрикційного контакту. По-друге, при зростанні контактного навантаження питома робота тертя зменшується, в середньому, в 1,8 рази, в порівнянні з періодом припрацювання. Механізм встановлених енергетичних характеристик контакту реалізується за рахунок диспергування аустенітного зерна, зменшення хімічної і структурної неоднорідності, додаткового дисперсійного зміцнення нанорозмірними внутрішньозеренними частинками нітриду ванадію, що забезпечує істотне підвищення міцності досліджуваної марки сталі без зменшення її пластичності і в'язкості при напрацюванні в нестационарних умовах тертя.

Енергетичний параметр контакту безпосередньо впливає на протизношувальні характеристики пар тертя. При використанні сталі зразок 1 збільшення зносу встановлено в 2,5 разів більше, ніж для зразку 2 (рис. 3).

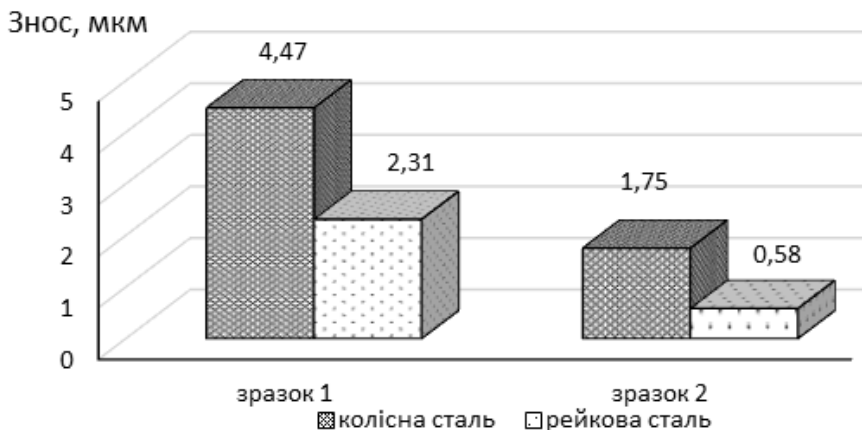


Рис. 3. Лінійний знос трибоспряження колісна – рейкова сталі в нестационарних умовах тертя

Встановлено, що внаслідок ефективної структурної пристосованості до динамічних умов навантаження дисперсійно нітридванадієво зміцненої колісної сталі, контртіло, в якості якого було обрано рейкову сталь, проявляє також підвищену зносостійкість – його лінійний знос в 3,9 разів менше, в порівнянні з умовами роботи в трибоспряженні з зразком 1. Підвищення зносостійкості трибоспряження зразок 2 – рейкова сталь обумовлено меншою інтенсивністю структурних змін поверхневих та приповерхневих шарів металу. Основний чинник, який впливає на дані процеси, – це інтенсивність тепловиділення в зоні тертя $Q_{\text{вид}}$, яка, згідно [10], залежить від потужності тертя та визначається співвідношенням:

$$Q_{\text{вид}} = f N_l V_{\text{ковз}}, \quad (1)$$

де f – коефіцієнт тертя, N_l – погонне навантаження, $V_{\text{ковз}}$ – швидкість ковзання.

За даною розрахунковою формулою на інтенсивність тепловиділення в зоні тертя в умовах експерименту впливає лише коефіцієнт тертя, оскільки інші параметри не змінюються. Однак, як зазначалось вище, коефіцієнт тертя не підвищувався за умов схоплювання контактних поверхонь для зразку 1, лише після 90-го циклу напрацювання він зростає в 1,33 рази, в порівнянні з зразком 2. В той же час, загальний лінійний знос колісна сталь зразок 1 – рейкова сталь більше в 2,9 разів, в порівнянні з аналогічним параметром для пари тертя колісна сталь зразок 2 – рейкова сталь. Таким чином, за формулою (1) не можливо встановити кореляцію між тепловиділенням в контакті та антифрикційними характеристиками.

На основі встановлених закономірностей щодо зміни питомої роботи тертя в контакті та зносом контактних поверхонь з урахуванням, що за умов зовнішнього тертя лише до 1% виділеної енергії в трибоконтаті поглинається поверхневими шарами металу, пропонуємо проводити оцінку інтенсивності тепловиділення в зоні тертя з урахуванням максимальних показників питомої роботи тертя в контакті ($A_{\text{трmax}}$):

$$Q_{\text{вид}} = 0,1 A_{\text{трmax}} N_l V_{\text{ковз}}. \quad (2)$$

За запропонованою формулою (2) для пари тертя колісна сталь зразок 2 – рейкова сталь $Q_{\text{вид}}$ зменшується в 2,4 рази, в порівнянні з трибоспряженням колісна сталь зразок 1 – рейкова сталь, що корелює з встановленими показниками лінійного зносу.

Оскільки, згідно [11], знос контактних поверхонь безпосередньо пов'язаний з питомою роботою пошкоджуваності, на основі одержаних експериментальних даних для пар тертя колісна сталь – рейкова сталь встановлено, що питома робота пошкоджуваності трибоспряження з зразком 1 в 2,3 рази менша, в порівнянні з зразком 2. Це свідчить про прогнозоване прискорення процесів руйнування в критичних поверхневих об'ємах матеріалу зразку 1 внаслідок інтенсифікації механо-фізико-хімічних процесів, які відбуваються з поглинанням енергії.

Підтвердженням інтенсифікації деформаційних змін в поверхневих об'ємах контактних поверхонь є протікаючі процеси зміцнення – знеміцнення їх поверхневих шарів. Для зразку 1 встановлено знеміцнення поверхневих шарів металу як на ділянках схоплювання (зміна мікротвердості складає $\Delta H_{100} = 651$ МПа, в порівнянні з вихідною поверхнею), так і на прилеглих до них ділянках ($\Delta H_{100} = 1034$ МПа) (рис. 4).

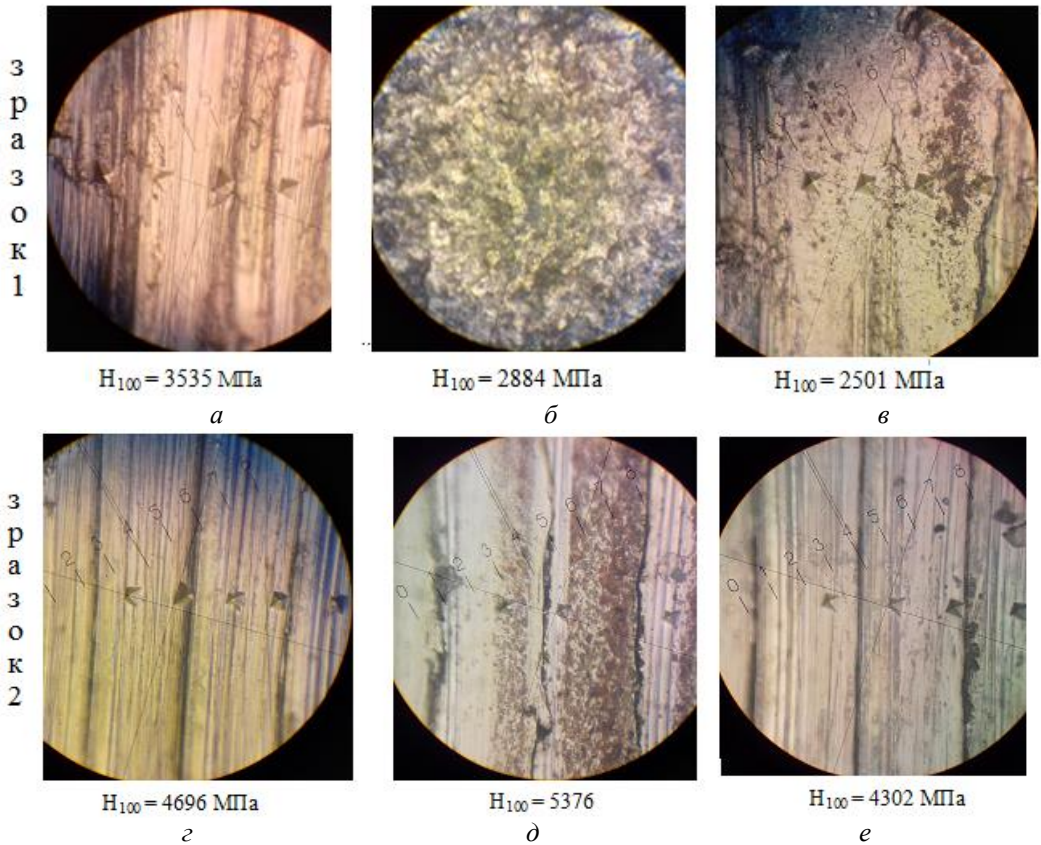


Рис. 4. Мікротвердість поверхневих шарів досліджуваних колісних сталей: *a, г* – вихідна поверхня, *б* – зона схоплювання, *в* – ділянки, прилегли до зони схоплювання, *д, е* – поверхня після напрацювання 130 циклів

Для дисперсійно нітридванадієво зміцненої колісної сталі зразку 2 схоплювання контактних поверхонь не встановлено. Поверхневі шари металу після напрацювання 130 циклів характеризуються, переважно, зміцненням ($\Delta H_{100} = 680 \text{ МПа}$), лише, в середньому, на 15 % площі поверхні зафіксовано ділянки з знеміцненими шарами ($\Delta H_{100} = 394 \text{ МПа}$).

Таким чином, використання нітридванадієво зміцненої колісної сталі забезпечує підвищення зносостійкості трибоконтакту за рахунок зниження енергетичних процесів при структурній пристосованості елементів трибоспряження.

Висновки. Проведений аналіз триботехнічних характеристик колісних сталей встановив позитивний вплив технології мікрولهгування сталі ванадієм і азотом на протизношувальні, міцнісні та енергетичні характеристики контакту. Дисперсійно нітридванадієво зміцнена сталь характеризується зниженням питомої роботи тертя в 1,8 рази, в порівнянні з періодом припрацювання, що свідчить про ефективну структурну пристосованість даної сталі в нестационарних умовах тертя при коченні з проковзуванням 3%. Встановлено підвищення зносостійкості трибоспряження нітридванадієво зміцнена колісна сталь – рейкова сталь за рахунок зниження інтенсивності деформаційних процесів в поверхневих та приповерхневих шарах металу.

Список літератури

1. Михайлов Е., Рейдемейстер А., Семенов С. Возможности улучшения ресурсосбережения на рельсовом транспорте. – Lambert Academic Publishing, 2018. – 97с.
2. Фомін О. В., Швець А. О., Болотов О. М., Сапарова Л. С. Визначення показників зносу за нерівномірного завантаження вантажного рухомого складу. Вісник сертифікації залізничного транспорту. – 2020. № 01 (59). С. 19–29.
3. Глазунов Д. В. Повышение эффективности смазывания гребней колес тягового подвижного состава и рельсов Специальность 05.02.04 – Трение и износ в машинах ДИССЕРТАЦИЯ на соискание ученой степени кандидата технических наук (ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный университет путей сообщения» Ростов-на-Дону 2014, 145с.
4. Аналіз розвитку основних дефектів і теоретичне прогнозування ресурсу рейок в умовах мащення / С. В. Воронін, Б. С. Асатов, В. О. Стефанов, Д. В. Онопрейчук, О. О. Губін // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2020, № 2 (86). – С. 35-45.
5. Кульбовський І.І., Демченко В.О. Аналіз впливу змін умов експлуатації взаємодіючої пари рейка-колесо на знос поверхні кочення в проектах залізничного транспорту. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: Науково-технічний збірник. Вип. 93. – К.: НТУ, 2015. – С. 192-205.
6. Бабаченко А.И., Филиппов А.А., Дементьева Ж.А., Кононенко А.А. Разработка новой системы микролегирования стали для высокопрочных железнодорожных колес / Строительство, материаловедение, машиностроение: Стародубовские чтения – 2017. – Вып. 96.– С.13-17.
7. Новые рельсовые и колесные стали для железнодорожного транспорта недалекого будущего / С. Я. Шипицин, Ю. З. Бабаскин, В. П. Короленко, Н. Я. Золотарь // Металл и литье Украины. – 2013. – № 6 (241). – С.29-33.
8. Новая сталь для железнодорожных колес с повышенным ресурсом / С. Я. Шипицин, О. П. Осташ, В. В. Кулик, І. Ф. Кірчу, В. Г. Новицький // Металл и литье Украины. – 2018. – № 5-6 (300-301). – С. 52-61.
9. Патент 88748, Україна, МПК G01N 3/56. Пристрій для оцінки триботехнічних характеристик трибоелементів / Мікосянчик О. О.; заявник та патентовласник Мікосянчик О. О. – № u 2013 13450; заявл. 19.11.2013; опубл. 25.03.2014, Бюл. № 6. – 4 с.
10. Дроздов Ю.Н., Арчegov В.Г., Смирнов В.И. Противозадирная стойкость трущихся тел. – М.: Наука, 1981. – 275 с.
11. Костецкий Б. И. Поверхностная прочность материалов при трении / Б. И. Костецкий, И. Г. Носовский, А. К. Караулов. – К.: Техніка, 1976. – 296 с.

Стаття надійшла до редакції 20.09.2021.

Бородій Віктор – заступник декана аерокосмічного факультету, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 70 10, E-mail: wiktbor@ukr.net.

Мікосянчик Оксана Олександрівна – д. техн. наук, професор, завідувач кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 77 70, E-mail: oksana.mikos@ukr.net.

V. M. BORODIY, O. A. MIKOSIANCHYK.

TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF DISPERSION NITRIDANADIUM-STRENGTHENED STEELS

Analysis of anti-friction, anti-oil and energy characteristics of wheeled and rail steels was carried out. The positive effect of microleag technology of vanadium and nitrogen on the tribotechnical characteristics of the wheeled steel has been established. Dispersion nitridanadium strengthened steel is characterized by a decrease in the specific operation of friction by 1.8 times, compared with the period of bedding, indicating an effective structural adaptability of this steel in non-stationary friction conditions during bedding of 3%. The processes of structural adaptability of nitridanadium strengthened wheel steel from the positions of mechano-and-physical as well as chemical processes occurring with the absorption of energy by surface and near-surface metal layers are considered. For the studied wheeled steel, the capture of the contact surfaces is not established, the surface layers of metal after working 130 cycles are characterized, preferably strengthening ($\delta H_{100} = 680$ MPa), only, on average, by 15% of the surface area, plots with severe layers are recorded. It has been established that as a result of effective structural adaptability to dynamic load conditions, dispersion nitridanadium strengthened wheeled steel, counterattack, which was selected by rail steel, also manifests increased wear resistance - its linear wear is 3.9 times less, compared to working conditions in tribological standard wheeled steel.

Key words: micro alloying, microhardness, specific gravity of friction, antifriction properties, wear resistance.

References

1. Mihajlov E., Rejdemejster A., Semenov S. Vozmozhnosti uluchsheniya resursosberezheniya na rel'sovom transporte. – Lambert Academic Publishing, 2018. – 97c.
2. Fomin O. V., SHvec' A. O., Bolotov O. M., Saporova L. S. Vznachennyya pokaznikov znosu za nerivnomirnogo zavantazheniya vantazhnogo ruhomogo skladu. Visnik sertifikatsii zaliznichnogo transportu. - 2020. № 01 (59). S. 19–29.
3. Glazunov D. V. Povyshenie effektivnosti smazyvaniya grebnej koles tyagovogo podvizhnogo sostava i rel'sov Special'nost' 05.02.04 – Trenie i iznos v mashinah DISSERTACIYA na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk (FGBOU VPO «Rostovskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya» Rostov-na-Donu 2014, 145s.
4. Analiz rozvittu osnovnih defektiv i teoretichne prognozuvannya resursu rejok v umovah mashchennya / S. V. Voronin, B. S. Asadov, V. O. Stefanov, D. V. Onoprejchuk, O. O. Gubin // Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universitetu zaliznichnogo transportu, 2020, № 2 (86). – S. 35–45.
5. Kul'bovs'kij I.I., Demchenko V.O. Analiz vplivu zmin umov ekspluatatsii vzaemodiyuchoi pari rejka-koleso na znos poverhni kochennya v proektah zaliznichnogo transportu. Avtomobil'ni dorogi i dorozhne budivnictvo: Naukovo-tekhnicnij zbirnik. Vip. 93. – K.: NTU, 2015. – S. 192–205.
6. Babachenko A.I., Filippov A.A., Dement'eva ZH.A., Kononenko A.A. Razrabotka novoj sistemy mikrolegirovaniya stali dlya vysokoprochnyh zheleznodorozhnyh koles / Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie: Starodubovskie chteniya – 2017. –Vyp. 96. – S.13–17.
7. Novye rel'sovyje i kolesnye stali dlya zheleznodorozhnogo transporta nedalekogo budushchego / S. YA. SHipicin, YU. Z. Babaskin, V. P. Korolenko, N. YA. Zolotar' // Metall i lit'e Ukrainy. – 2013. –№ 6 (241). – S.29–33.
8. Novaya stal' dlya zheleznodorozhnyh koles s povyshennym resursom / S. YA. SHipicin, O. P. Ostash, V. V. Kulik, I. F. Kirchu, V. G. Novic'kij // Metall i lit'e Ukrainy. – 2018. – № 5-6 (300-301). – S. 52-61.
9. Patent 88748, Ukraïna, MPK G01N 3/56. Pristrij dlya ocinki tribotekhnichnih karakteristik triboelementiv / Mikosyanchik O. O.; zayavnik ta patentovlasnik Mikosyanchik O. O. – № u 2013 13450; zayavl. 19.11.2013; opubl. 25.03.2014, Byul. № 6. – 4 s.
10. Drozdov YU.N., Arhegov V.G., Smirnov V.I. Protivozadirnaya stojkost' trushchihysya tel. – M.: Nauka, 1981. – 275c.
11. Kosteckij B. I. Poverhnostnaya prochnost' materialov pri trenii / B. I. Kosteckij, I. G. Nosovskij, A. K. Karaulov. – K.: Tekhnika, 1976. – 296 c.