

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

УДК 625.143:620.192

С. В. ВОРОНІН^{1*}, Б. С. АСАДОВ^{2*}, В. О. СТЕФАНОВ^{3*}, Д. В. ОНОПРЕЙЧУК^{4*},
О. О. ГУБІН^{5*}

^{1*}Каф. «Будівельні, колійні та вантажно-розвантажувальні машини», Український державний університет залізничного транспорту, майд. Феєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 66, ел. пошта voronin.sergey@ukr.net, ORCID 0000-0001-8443-3222

^{2*}Закрите акціонерне товариство «Азербайджанські залізниці», вул. Діляри Алієвої, 230, Баку, Азербайджан, AZ1010, тел. +38 (057) 730 10 72, ел. пошта asadovbs@ukr.net, ORCID 0000-0002-6475-0623

^{3*}Каф. «Будівельних, колійних та вантажно-розвантажувальних машин», Український державний університет залізничного транспорту, майд. Феєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 72, ел. пошта vstef@ukr.net, ORCID 0000-0002-7947-2718

^{4*}Каф. «Будівельні, колійні та вантажно-розвантажувальні машини», Український державний університет залізничного транспорту, майд. Феєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 72, ел. пошта dmytroonopriychuk@ukr.net, ORCID 0000-0002-6314-3936

^{5*}Каф. «Будівельні, колійні та вантажно-розвантажувальні машини», Український державний університет залізничного транспорту, майд. Феєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050, тел. +38 (057) 730 10 72, ел. пошта sash.gubin95@gmail.com, ORCID 0000-0001-8451-5236

АНАЛІЗ РОЗВИТКУ ОСНОВНИХ ДЕФЕКТІВ І ТЕОРЕТИЧНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСУ РЕЙОК В УМОВАХ МАЩЕННЯ

Мета. Дослідження спрямовано на виявлення закономірностей впливу навантаження на рейку та параметрів двошарового мащення на розвиток основних дефектів рейки, а саме - бокового зносу у кривих ділянках залізничної колії. **Методика.** Для розподілу основних дефектів рейок використано результати експертних оцінок служби колії Азербайджанської залізниці щодо виміру дефектних параметрів та строків служби рейок за окремими ділянками. Для встановлення закономірностей впливу навантаження та параметрів двошарового мащення на інтенсивність зношування рейок та їх ресурс у кривих використано основні положення механіки контактної взаємодії, трибології та хімотології. **Результати.** Автори довели: 1) основними дефектами рейок у кривих ділянках колії є дефекти, пов'язані з низькою контактної-втомною міцністю сталі та високими контактними напруженнями й силами тертя; 2) згідно із встановленим розподілом, до основних дефектів рейок у кривих слід відносити: боковий знос головки, викришування металу по боковій поверхні, наявність поперечних тріщин у головці; 3) застосування двошарового мащення призводить до збільшення фактичної площі контакту колеса та рейки, зменшення контактної тиску на рейку та, у сукупності, до уповільнення бокового зношування та збільшення ресурсу рейок. **Наукова новизна.** Автори вперше виконали систематизацію результатів вимірювань параметрів дефектів рейок у кривих та на цій основі отримали розподіл основних дефектів залежно від радіуса кривої. Також автори вдосконалили математичну модель для розрахунку ресурсу рейок у кривих, яка, на відміну від наявних, урахує товщину мастильної плівки та концентрацію твердої антифрикційної добавки в оливі під час виконання мащення бокової поверхні. **Практична значимість.** Отримані результати дозволяють виконувати прогностичні розрахунки ресурсу рейок у кривих ділянках залежно від навантаження від колеса для різних експлуатаційних умов, а саме за сухого контакту колеса рейкою та в умовах їх двошарового мащення. Реалізація двошарового мащення рейок на залізничному транспорті з урахуванням впливу досліджених параметрів призведе до підвищення ресурсу рейок у кривих на 55, 50 та 45 % за розрахункової маси рухомого складу 60, 70 та 80 т.

Ключові слова: залізничний транспорт; рейка; вагон; колесо; контакт; навантаження; дефект; боковий знос; ресурс; мащення

Вступ

Досвід експлуатації залізниць установлює одним з основних завдань упровадження технологій уповільнення розвитку основних дефектів рейок, особливо в кривих ділянках вантажонапружених перегонів [1–4]. До передових методів запобігання з розвитку основних дефектів належать поліпшення контактної-втомної міцності рейкової сталі, попереджувальне та планове шліфування, а також рейкозмащування [9–14]. Найменш опрацьованим, але перспективним, є рейкозмащування, яке в деяких країнах світу широко застосовують, однак у більшості країн колишнього СРСР перебуває на початковій стадії розвитку. Це пов'язано з коливаннями якості рейкової сталі, зимовими умовами, підсіпанням піску, низькою ефективністю дешевих змащувачів, високою вартістю імпортованих комп'ютеризованих систем, людським фактором, як наслідок, відсутністю наукових засад раціонального впровадження методу змащування рейок [3, 13, 14].

Мета

Дослідження ставить за мету отримання закономірностей впливу навантаження на рейку та параметрів двошарового мащення на розвиток основних дефектів рейок, їх боковий знос і ресурс у кривих ділянках колії. Завданнями дослідження є:

- виконання аналізу розподілу дефектів рейок та встановлення на цій основі залежності зміни ресурсу рейок від радіусів кривих;
- удосконалення математичної моделі розрахунку ресурсу рейок у кривих та отримання цільових закономірностей.

Методика

Для розподілу основних дефектів рейок за типами та ділянками колії використано результати експертних оцінок служби колії Азербайджанської залізниці щодо виміру дефектних параметрів рейок за окремими ділянками. Для

встановлення закономірностей впливу навантаження та параметрів двошарового мащення на інтенсивність бокового зношування рейок та їх ресурс у кривих використано основні положення механіки контактної взаємодії за пружного та пластичного контакту, а також трибології та хімотології.

Аналіз розподілу дефектів рейок. На рис. 1 наведено дані оцінок дефектів рейок на 174 кривих ділянках магістральних колій Азербайджанської залізниці. На рис. 1, а наведено дані щодо розподілу дефектів за видами по однотипних групах ділянок. Кольорами відзначено види дефектів за класифікацією, поданою в інструкції ЦП–0285 [5]. На рис. 1, б показано загальний (сумарний) розподіл по всіх ділянках за окремими видами дефектів.

Як видно з рис. 1, мають місце дефекти різних видів, однак для кривих ділянок переважають дефекти, як по мірі зменшення їх частки поділяють на такі:

- 44.1–2, боковий знос головки рейки, складає 26 % від загальної кількості;
- 11.1–2, викришування металу на боковій робочій викружці, складає 25 % від загальної кількості;
- 10.1–2, викришування й відшарування металу на поверхні кочення, складає 24 % від загальної кількості;
- 21.1–2, поперечні тріщини в головці, складають 13 % від загальної кількості;
- 37.1–2, горизонтальне розшарування головки, складає 11 % від загальної кількості.

Відзначимо, що такі дефекти як боковий знос (44.1–2) та викришування металу на боковій робочій поверхні (11.1–2), характерні переважно для рейок у кривих ділянках колії, що було зазначено в попередніх дослідженнях [4, 8, 10]. Отримані дані свідчать про недостатню зносостійкість та контактної-втомної міцності рейкової сталі, що підтверджується значним боковим зносом робочої поверхні рейки у кривих. Це потребує пошуку експлуатаційних методів запобігання з розвитку дефектів.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

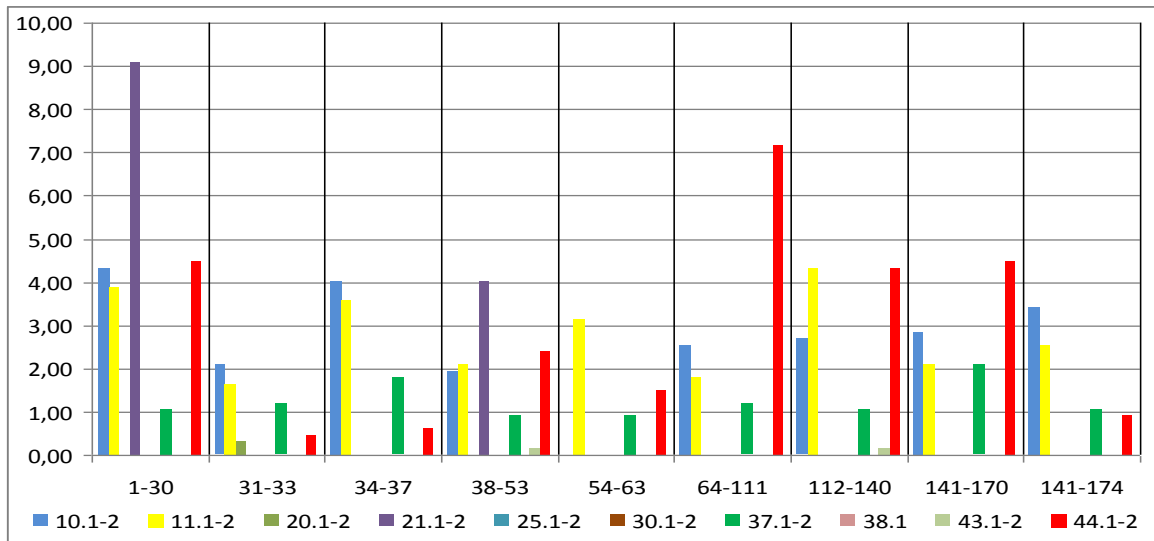
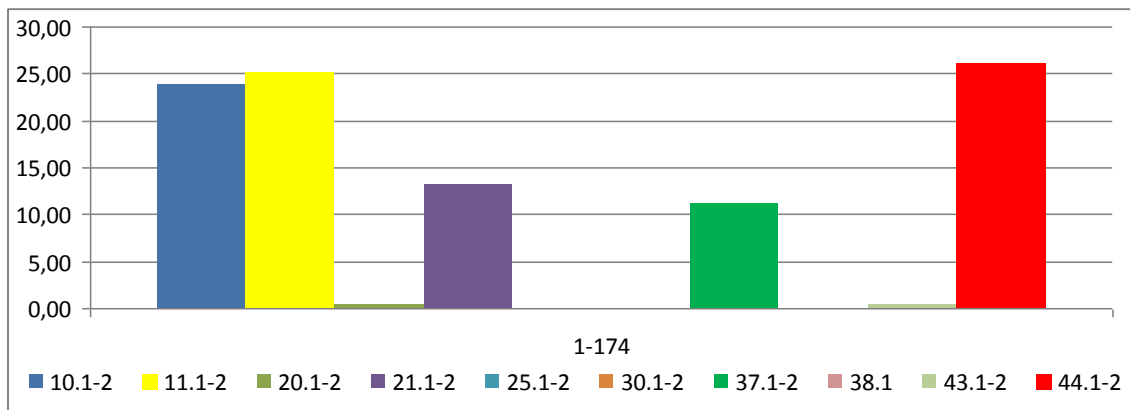
a – a*б – б*

Рис. 1. Розподіл дефектів рейок (у %) по кривих ділянках залізниці:
a – за видами по однотипних групах ділянок;
б – загальний для всіх ділянок за видами дефектів, згідно з класифікацією ЦП–0285

Fig. 1. Distribution of rail defects (in %) over curved sections of railway:
a – by types by same groups of sections;
b – common for all sections by types of defects, according to the ЦП–0285 classification

Нижче, на рис. 2, наведено результати статистичного аналізу визначення інтенсивності зношування та ресурсу рейок у досліджуваних кривих ділянках.

На рис. 2, *a* наведено дані щодо розподілу інтенсивності бокового зношування рейок у кривих ділянках. Окремим кольором позначено діапазони радіусів кривих, від 300 до 1 200 м, за якими згруповані ділянки. Такі дані дозволили встановити середній ресурс рейок залежно від діапазону радіуса кривих, як пока-

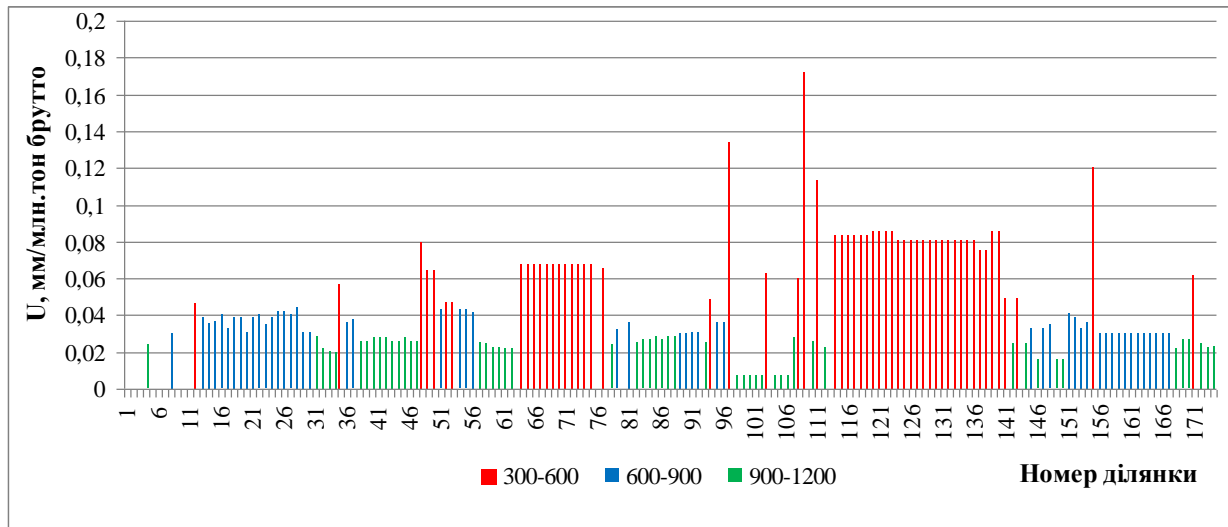
зано на рис. 2, *б*. У цьому випадку ресурс по окремій ділянці визначено як відношення встановленого граничного бокового зносу рейки до інтенсивності зношування, після чого отримані дані усереднено за кожним діапазоном, до якого входить та чи інша група ділянок. Як видно з рис. 2, *б*, ресурс рейок у кривих нелінійно залежить від радіуса та складає 170 млн т бруто для кривих 300–600 м; 450 млн т бруто для кривих 600–900 м; 560 млн т бруто для кривих 900–1 200 м. Отримані дані свідчать про досить

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

низький ресурс рейок, навіть для кривих великого радіуса, що потребує, як було сказано вище, пошуку методів зменшення інтенсивності бокового зношування рейок. Одним із перспек-

тивних, однак найменш вивчених, є метод змащування рейок, саме тому подальші дослідження спрямовані на прогнозування ресурсу рейок в умовах змащування.

a – a



b – b

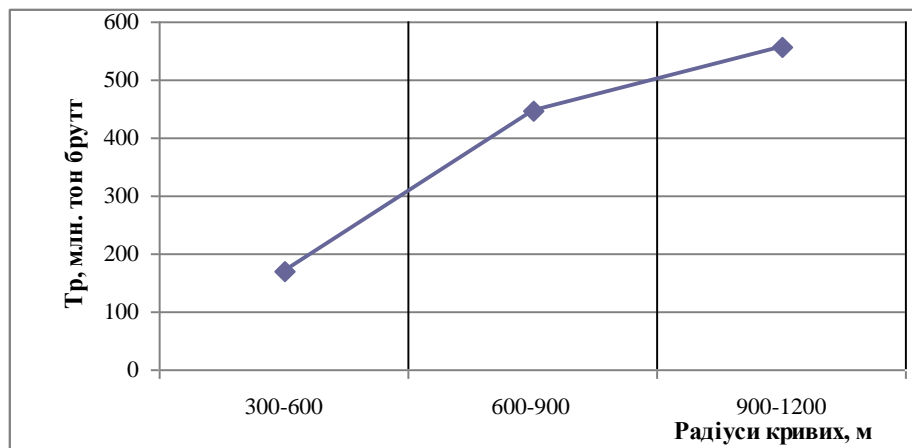


Рис. 2. Інтенсивність зношування та ресурс рейок з кривих ділянках залізниці:

a – інтенсивність зношування по досліджених ділянках, які згруповані за трьома діапазонами радіусів кривих;
b – залежність усередненого ресурсу рейок від радіуса кривих

Fig. 2. Wear intensity and service life of the rails on the curved sections of the railway:

a – wear intensity on the investigated sections, which are grouped by three ranges of the curve radius;
b – dependence of the average rail service life on the curve radius

Модель прогнозування ресурсу рейок. Під час розробки моделей прогнозування ресурсу на основі вивчення процесу зношування слід спиратися на відомі підходи в галузі трибології, з урахуванням механізму контактної взаємодії

рейки та колеса по бічній поверхні [6, 8]. У цьому дослідженні розглянуто вплив параметрів двошарового мащення рейки на величину фактичної площі контакту, тиск у контакті, інтенсивність зношування та, як наслідок, ре-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

сурс. Згідно з попередніми роботами авторів та інших дослідників, під двошаровим мащенням слід розуміти нанесену на робочу поверхню рейки мастильну плівку, яка складається з першого (нижнього) шару твердої антифрикційної добавки, наприклад, графіту, та другого (верхнього) шару, який являє собою полімолекулярний граничний шар, утворений із молекул оливи [7, 13, 14]. Перший шар заповнює нерівності поверхні, збільшуючи тим самим фактичну площу контакту, що має антифрикційні властивості. Другий шар – квазікристалічний, він демпфує зовнішнє навантаження і також має добрі антифрикційні властивості. Виходячи з цих міркувань, можна запропонувати розрахункову схему для побудови моделі прогнозування ресурсу, яка наведена на рис. 3.

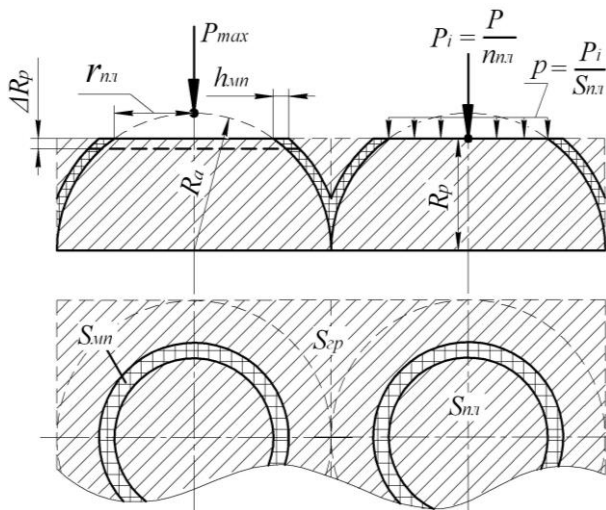


Рис. 3. Розрахункова схема контакту в разі двошарового мащення

Fig. 3. Calculated contact scheme for two-layer oiling

На схемі, згідно з рис. 3, узяті такі позначення: P_{\max} – максимальне бокове навантаження від колеса на рейку, Н; P_i – навантаження на одиничну нерівність, Н; p – контактний тиск, МПа; $n_{\text{пл}}$ – кількість нерівностей на контурній площі контакту; $S_{\text{пл}}$ – одинична площа контакту після пластичної деформації з урахуванням плівок, м²; $r_{\text{пл}}$ – радіус у плані одиничної площі контакту після пластичної деформації, без урахування плівок, м; $h_{\text{мпл}}$ – товщина мастильної плівки (другого шару), м; R_a – початковий середній радіус нерівностей, м; R_p – середня висота нерівностей після їх пластичного дефор-

мування, м; ΔR_p – зона пружних деформацій, м; $S_{\text{мпл}}$ – площа, яку займає мастильна плівка товщиною $h_{\text{мпл}}$, м²; $S_{\text{гр}}$ – площа поверхні, що може бути заповнена графітом, м².

Критеріями двошарового мащення є концентрація графіту в оливі $c_{\text{гр}}$ та товщина мастильної плівки $h_{\text{мпл}}$ – другий шар. У загальному вигляді ресурс рейок, у млн т бруто, може бути визначений як:

$$T(m_{\text{ваг}}, c_{\text{гр}}) = \frac{I_{\text{LIM}}}{I_{\text{ic}}(m_{\text{ваг}}, c_{\text{гр}}) \cdot n_{\text{кп}}} \cdot m_{\text{ваг}}, \quad (1)$$

де I_{LIM} – граничний ваговий знос, кг; $m_{\text{ваг}}$ – маса вагона, т; $n_{\text{кп}}$ – число колісних пар вагона; I_{ic} – вагова інтенсивність зношування, кг/цикл.

Граничний ваговий знос дорівнює

$$I_{\text{LIM}} = S_{\text{кон}} \cdot h_{\text{LIM}} \cdot \rho_{\text{ст}}, \quad (2)$$

де $S_{\text{кон}}$ – контурна площа контакту, м²; h_{LIM} – граничний лінійний (боковий) знос, м; $\rho_{\text{ст}}$ – щільність рейкової сталі, кг/м³.

Основним фактором, що впливає на ресурс рейки, є інтенсивність зношування I_{ic} , яка залежить від зовнішніх навантажень, механічних властивостей сталі та параметрів мащення. У нашому випадку змінним параметром мащення є концентрація графіту в оливі c , тоді залежність для визначення інтенсивності зношування має такий вигляд:

$$I_{\text{ic}}(m_{\text{ваг}}, c_{\text{гр}}) = \Delta V_{\text{сег}}(m_{\text{ваг}}, c_{\text{гр}}) \cdot n_{\text{пл}} \cdot \rho_{\text{ст}}, \quad (3)$$

де $\Delta V_{\text{сег}}$ – об'єм зношеного матеріалу на 1-й нерівності від проходження 1-ї колісної пари, м³; $n_{\text{пл}}$ – кількість нерівностей на контурній площі контакту, шт.

Об'єм зношеного матеріалу однієї нерівності за один цикл навантаження визначаємо з урахуванням теорій пружності, пластичності та малоциклової втомленості:

$$\Delta V_{\text{сег}}(m_{\text{ваг}}, c_{\text{гр}}) = \pi \cdot \int_{R_p(m_{\text{ваг}}) - \Delta R_p(m_{\text{ваг}})}^{R_p(m_{\text{ваг}})} (Ra^2 - x^2) dx. \quad (4)$$

Якщо

$$\Delta R_p(m_{\text{ваг}}, c_{\text{гр}}) = \frac{P_i(m_{\text{ваг}}, c_{\text{гр}}) \cdot R_p(m_{\text{ваг}})}{E \cdot S_{\text{пл}}(m_{\text{ваг}}) \cdot n_{\text{ic}}(m_{\text{ваг}}, c_{\text{гр}})}, \quad (5)$$

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

де E – модуль пружності рейкової сталі, МПа, а n_{IC} – кількість циклів навантаження деформованого об'єму нерівності до руйнування, тоді $\Delta V_{сег}$ – це частина об'єму пружно деформованої нерівності, що зношується від проходження по ній одного колеса. Відзначимо, що R_p є початковою висотою «припрацьованих» нерівностей, яка утворюється шляхом пластичної деформації нерівностей нової рейки з висотою Ra , після чого контакт рейки та колеса розглядаємо як пружний дискретний контакт по всіх нерівностях у межах контурної площі.

Початкова висота R_p дорівнює

$$R_p = \sqrt{Ra^2 - \frac{P_{\max}}{\pi \cdot \sigma_{ст}}}, \quad (6)$$

де $\sigma_{ст}$ – межа плинності рейкової сталі, МПа, а одинична площа контакту після пластичної деформації $S_{пл}$ дорівнює:

$$S_{пл}(m_{ваг}) = \pi(Ra^2 - R_p(m_{ваг})^2) + \pi((Ra + h_{мп})^2 - Ra^2). \quad (7)$$

Залежність (7) урахує другий параметр двошарового мащення – товщину мастильної плівки $h_{мп}$.

Максимальне бокове навантаження P_{\max} залежить від маси вагона й кількості колісних пар та, згідно з [2, 9, 11], складає 60 % від вертикального навантаження, що приблизно відповідає радіусам кривих 600 м та середній швидкості рухомого складу 80 км/год:

$$P_{\max} = \frac{m_{ваг}^{\max} \cdot 10^3 \cdot g}{n_{кп} \cdot 2} \cdot 0,6, \quad (8)$$

а навантаження на одиничну нерівність P_i :

$$P_i(m_{ваг}, c_{гр}) = \frac{m_{ваг} \cdot 10^3 \cdot g}{n_{кп} \cdot 2 \cdot n_{пл}} \cdot 0,6 - \sigma_{гр} \cdot S_{гр}, \quad (9)$$

де $\sigma_{гр}$ – межа міцності графіту, МПа.

Площа $S_{гр}$, що може бути заповнена графітом, дорівнює:

$$S_{гр}(m_{ваг}, c_{гр}) = \sqrt{S_{грф}(m_{ваг})^2 - \left(S_{грф}(m_{ваг}) - S_{грф}(m_{ваг}) \cdot \frac{c_{гр}}{c_{LIM}(m_{ваг})} \right)^2}, \quad (10)$$

де $S_{грф}$ – поточна площа заповнення графітом за певної концентрації, м², яку визначаємо так:

$$S_{грф}(m_{ваг}) = 4 \cdot Ra^2 - \pi(Ra^2 - R_p(m_{ваг})^2); \quad (11)$$

c_{LIM} – гранична концентрація графіту, за якої буде заповнений весь об'єм на контурній площі контакту, %:

$$c_{LIM}(m_{ваг}) = \frac{4 \cdot Ra^2 \cdot R_p(m_{ваг}) - \pi \left(\int_0^{R_p(m_{ваг})} (Ra - x)^2 dx \right)}{16 \cdot Ra^2 \cdot R_p(m_{ваг})} \cdot 100. \quad (12)$$

Кількість циклів до руйнування пружно деформованого об'єму нерівності, за теорією малоциклової втоми, є ступеневою функцією відношення $\sigma_{ст}$ до тиску в контакті [7, 10]:

$$n_{IC}(m_{ваг}, c_{гр}) = \left(\frac{\sigma_{ст}}{P_i(m_{ваг}, c_{гр}) / S_{пл}(m_{ваг})} \right)^6. \quad (13)$$

Залежності (4) – (13) у явному вигляді розкривають залежність (3) для інтенсивності зношування та дозволяють вести розрахунки як окремих характеристик контакту, так і ресурсу рейок, з урахуванням параметрів двошарового мащення, зовнішніх навантажень, геометрії контакту та міцності рейкової сталі.

На рис. 4 наведено результати розрахунку основних характеристик контакту, зношування та ресурсу рейок. Розрахунок виконано в програмному комплексі Mathcad за таких вихідних даних: $m_{ваг}^{\max} = 90$ т; розрахунковий діапазон маси вагонів $m_{ваг} = 60 \dots 80$ т; $h_{LIM} = 0,013$ м; $h_{мп} = 0,1 \times 10^{-6}$ м; $c_{гр} = 0 \dots 3$ %.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

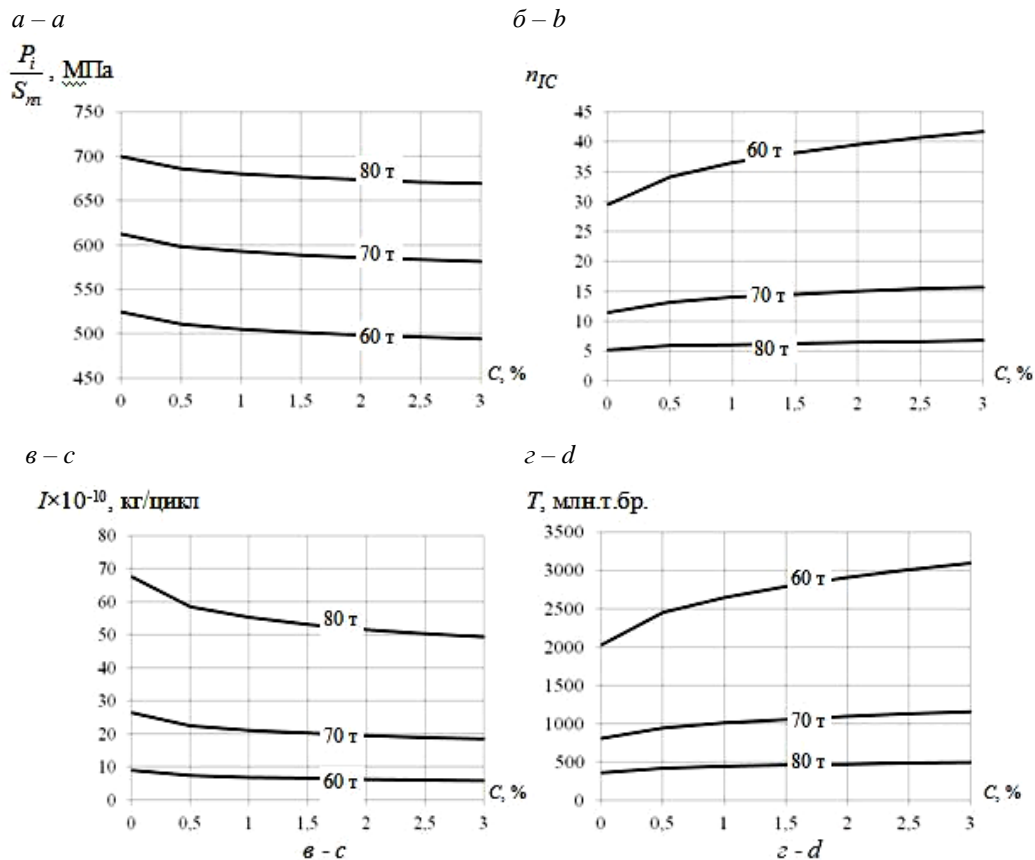


Рис. 4. Результати розрахунків:

a – тиск на фактичній площі контакту; *b* – кількість циклів до руйнування пружно деформованого об'єму нерівності; *c* – інтенсивність зношування рейки; *d* – ресурс рейки

Fig. 4. Results of calculations:

a – pressure on the actual contact area; *b* – number of cycles to destruction of elastically deformed volume of inequality; *c* – wear intensity of rail; *d* – rail service life

Слід відзначити, що отримані розрахункові залежності (1) – (13) та результати розрахунків, наведені на рис. 4, не враховують швидкості руху вагонів, що робить математичну модель «статичною». Це є її головним недоліком, однак, зважаючи на відсутність аналогічних моделей для прогнозування ресурсу рейок в умовах двошарового мащення, отримані залежності є єдиними за своїм призначенням, а достовірність отриманих результатів достатньо висока, як буде показано нижче під час зіставлення фактичних та розрахункових значень ресурсу.

Результати

У першій частині дослідження на основі аналізу фактичного стану рейок Азербайджанських залізниць встановлено, що домінуючими дефек-

тами рейок у кривих є дефекти, пов'язані з низькою зносостійкістю та контактнo-втомною міцністю сталі, а саме боковий знос і тріщиноутворення з викришуванням металу на боковій робочій викружці. Інтенсивність розвитку вказаних дефектів установлює величину ресурсу рейок, що складає 170 млн т бруто для кривих 300–600 м; 450 млн т бруто для кривих 600–900 м; 560 млн т бруто для кривих 900–1 200 м.

У другій частині дослідження виконано побудову залежностей для прогнозування ресурсу рейок у кривих в разі реалізації їх двошарового мащення. Установлено, що у випадку застосування двошарового мащення тиск на фактичній площі контакту зменшується приблизно на 5 % (рис. 4, *a*), а число циклів навантаження до руйнування деформованих об'ємів нерівностей

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

зростає в 1,4 раза, як показано на рис. 4, б. Такі фізичні явища сприяють зменшенню інтенсивності зношування рейок у кривих, як наслідок, підвищенню їх ресурсу. Наприклад, згідно з рис. 4, в, інтенсивність зношування рейок зменшується в середньому на 34 % для досліджуваного діапазону маси вагонів. Відповідно, зі збільшенням концентрації графіту в оливі ресурс рейок зростає на 55 % для вагонів масою 60 т, на 50 % для вагонів масою 70 т і на 43 % для вагонів масою 80 т, як показано на рис. 4, з. Розрахункові значення ресурсу рейок у разі їх мащення чистою оливою (без графіту) складають від 350, 800, 2 000 млн т бруто для вагонів масою 80, 70, 60 т відповідно. Отримані значення близькі до фактичних значень першої частини досліджень – 170...560 млн т бруто для кривих різних радіусів, що говорить про високу достовірність розрахунків за отриманими залежностями.

Наукова новизна та практична значимість

Автори вперше виконали систематизацію результатів вимірювань параметрів дефектів рейок у кривих та на цій основі отримали розподіл основних дефектів залежно від радіуса кривої. Також автори вдосконалили математичну модель для розрахунку ресурсу рейок у кривих, яка на відміну від наявних, ураховує товщину мастильної плівки та концентрацію твердої антифрикційної добавки в оливі під час виконання двошарового мащення бокової робочої поверхні рейки.

Отримані результати дозволяють виконувати прогностичні розрахунки ресурсу рейок у кривих ділянках залежно від навантаження від колеса для різних експлуатаційних умов, а саме за сухого контакту колеса з рейкою та в умовах їх двошарового мащення за змінної концентрації графіту в оливі. Реалізація двошарового мащення рейок на залізничному транспорті,

з урахуванням впливу досліджених параметрів, призведе до підвищення ресурсу рейок у кривих на 55, 50 та 45 % за розрахункової маси рухомого складу 60, 70 та 80 т.

Висновки

Установлений розподіл основних дефектів та ресурс рейок у кривих ділянках, а також розрахунки за запропонованою удосконаленою математичною моделлю прогнозування ресурсу рейок в умовах їх двошарового мащення дозволили зробити такі висновки:

– домінуючими дефектами рейок у кривих магістральних колій Азербайджанських залізниць є боковий знос та викришування металу на боковій робочій викрутці;

– інтенсивність розвитку вказаних дефектів обмежує ресурс рейок на рівні 170 млн т бруто для кривих 300–600 м; 450 млн т бруто для кривих 600–900 м; 560 млн т бруто для кривих 900–1 200 м, що є недостатнім із точки зору ефективної експлуатації залізниць;

– запропонована математична модель прогнозування ресурсу рейок дозволяє виконувати розрахунки основних характеристик контакту та ресурсу рейок в умовах їх двошарового мащення, яке є найбільш перспективним із точки зору зменшення бокового зносу;

– згідно з виконаними розрахунками, двошарове мащення рейок суттєво підвищує їх ресурс, зі 170 до 350 млн т бруто за нульової концентрації графіту в оливі та до 500 млн т бруто за концентрації 3 %, що підтверджує високу ефективність такого мащення;

– одним із актуальних напрямів подальших досліджень, із точки зору вдосконалення запропонованого методу прогнозування ресурсу рейок, є врахування швидкості руху рухомого складу, тобто врахування впливу динамічних навантажень на характеристики контакту та інтенсивність зношування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Балановский А. Е. *Конец системы колесо-рельс и вновь начало* : монографія. Иркутск : ИрГТУ, 2011. 1010 с.
2. Богданов В. М., Захаров С. М. Современные проблемы системы колесо – рельс. *Железные дороги мира*. 2004. № 1. С. 57–62.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

3. Воронин С. В., Коростелев Е. Н. Анализ существующих способов уменьшения бокового износа рельсов в паре трения «колесо-рельс» в кривых участках пути. *ИКСЗТ*. 2014. № 3. С. 22–27.
4. Дацишин О. П., Марченко Г. П., Глазов А. Ю. Про поверхнєве руйнування головок залізничних рейок. *Наука та прогрес транспорту*. 2017. № 4 (70). С. 41–49. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/109539>
5. Класифікація та каталог дефектів і пошкоджень рейок на залізницях України : ЦП-0285. [Чинний від 2013-02-27 № 050-Ц/од]. Київ : ТОВ «Інпрес», 2013. 194 с.
6. Сосновский Л. А. *Основы трибофатики* : учебн. пособ. : в 2-х т. Гомель : БелГУТ, 2003. Т. 1. 246 с.
7. Фукс Г. И. Адсорбция и смазочная способность масел. *Трение и износ*. 1983. Т. 4. № 3. С. 398–412.
8. Чичинадзе А. В., Хебда М. *Справочник по триботехнике* : в 3 т. Москва : Машиностроение, 1990. Т. 2 : *Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения*. 419 с.
9. Керопуян А., Gorbatiyuk S. Impact of Roughness of Interacting Surfaces of the Wheel-Rail Pair on the Coefficient of Friction in their Contact Area. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 406–410. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.753>
10. Kuziak R., Zygmunt T. A New Method of Rail Head Hardening of Standard- Gauge Rails for Improved Wear and Damage Resistance. *Steel research international*. 2013. Vol. 84. Iss. 1. P. 13–19. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.201200140>
11. Ma L., He C. G., Zhao X. J., Guo J., Zhu Y., Wang W. J., ... Jin X. S. Study on wear and rolling contact fatigue behaviors of wheel/rail materials under different slip ratio conditions. *Wear*. 2016. Vol. 366. P. 13–26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.04.028>
12. Uddin M. G., Chattopadhyay G., Rasul M. Development of effective performance measures for wayside rail curve lubrication in heavy haul lines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F : Journal of Rail and Rapid Transit*. 2014. Vol. 228. Iss. 5. P.481–495. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409713482678>
13. Voronin S., Hrunyk I., Asadov B., Onopreychuk D. Study of the process of lubricant application on the friction surface using aerosol lubricators. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7. Iss. 4.3. P. 20–24. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19546>
14. Voronin S., Skoryk O., Stefanov V., Onopreychuk D. Study of the predominant defect development in rails of underground systems after preventive grinding and lubrication. *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 116. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711603005>

С. В. ВОРОНИН^{1*}, Б. С. АСАДОВ^{2*}, В. А. СТЕФАНОВ^{3*}, Д. В. ОНОПРЕЙЧУК^{4*},
А. А. ГУБИН^{5*}

^{1*}Каф. «Строительные, путевые и погрузочно-разгрузочные машины», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, тел. +38 (057) 730 10 66, эл. почта voronin.sergey@ukr.net, ORCID 0000-0001-8443-3222

^{2*}Закрите акционерное общество «Азербайджанские железные дороги», ул. Диляры Алиевой, 230, Баку, Азербайджан, AZ1010, тел. +38 (057) 730 10 72, эл. почта asadovbs@ukr.net, ORCID 0000-0002-6475-0623

^{3*}Каф. «Строительные, путевые и погрузочно-разгрузочные машины», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, тел. +38 (057) 730 10 72, эл. почта vstef@ukr.net, ORCID 0000-0002-7947-2718

^{4*}Каф. «Строительные, путевые и погрузочно-разгрузочные машины», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, тел. +38 (057) 730 10 72, эл. почта dmytroonopriyuchuk@ukr.net, ORCID 0000-0002-6314-3936

^{5*}Каф. «Строительные, путевые и погрузочно-разгрузочные машины», Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, тел. +38 (057) 730 10 72, эл. почта sash.gubin95@gmail.com, ORCID 0000-0001-8451-5236

АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ОСНОВНЫХ ДЕФЕКТОВ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА РЕЛЬСОВ В УСЛОВИЯХ СМАЗКИ

Цель. Исследование направлено на выявление закономерностей влияния нагрузки на рельс и параметров двухслойной смазки на развитие основных дефектов рельса, а именно - бокового износа в кривых участках железнодорожного пути. **Методика.** Для распределения основных дефектов рельсов использованы результаты экспертных оценок службы пути Азербайджанской железной дороги касательно измерений дефектных параметров и сроков службы рельсов по отдельным участкам. Для установления закономерностей влияния

Creative Commons Attribution 4.0 International
doi: <https://doi.org/10.15802/stp2020/203112>

© С. В. Воронин, Б. С. Асадов,
В. О. Стефанов, Д. В. Онопрейчук, О. О. Губин, 2020

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

нагрузки и параметров двухслойной смазки на интенсивность бокового изнашивания рельсов и их ресурс в кривых использованы основные положения механики контактного взаимодействия, трибологии и химмотологии. **Результаты.** Авторы доказали: 1) основными дефектами рельсов в кривых участках пути являются дефекты, связанные с низкой контактно-усталостной прочностью стали и высокими контактными напряжениями и силами трения; 2) согласно полученному распределению, к основным дефектам рельсов в кривых следует относить: боковой износ головки, выкрашивание металла по боковой поверхности, наличие поперечных трещин в головке; 3) использование двухслойной смазки приводит к увеличению фактической площади контакта колеса и рельса, снижению контактного давления на рельс и, в совокупности, к замедлению бокового изнашивания и повышению ресурса рельсов. **Научная новизна.** Авторы впервые провели систематизацию результатов измерений параметров дефектов рельсов в кривых и на этой основе получили распределение основных дефектов в зависимости от радиуса кривой. Также авторы усовершенствовали математическую модель для расчета ресурса рельсов в кривых, которая, в отличие от существующих, учитывает толщину смазочной пленки и концентрацию твердой антифрикционной добавки в масле при проведении смазывания боковой поверхности. **Практическая значимость.** Полученные результаты позволяют выполнять прогнозные расчеты ресурса рельсов в кривых участках в зависимости от нагрузки от колеса для разных эксплуатационных условий, а именно при сухом контакте колеса с рельсом и в условиях их двухслойной смазки. Реализация двухслойной смазки рельсов на железнодорожном транспорте с учетом влияния исследованных параметров приведет к повышению ресурса рельсов в кривых на 55, 50 та 45 % при расчетной массе подвижного состава 60, 70 и 80 т.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт; рельс; вагон; колесо; контакт; нагрузка; дефект; боковой износ; ресурс; смазка

S. V. VORONIN^{1*}, B. S. ASADOV^{2*}, V. O. STEFANOV^{3*}, D. V. ONOPREICHUK^{4*},
O. O. GUBIN^{5*}

^{1*}Dep. «Construction, Track and Cargo-Handling Machines», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Square, 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 10 66, e-mail voronin.sergey@ukr.net, ORCID 0000-0001-8443-3222

^{2*}Closed Joint-Stock Company «Azerbaijan Railways», Diliary Aliievoi St., 230, Baku, Azerbaijan, AZ1010, tel. +38 (057) 730 10 72, e-mail asadovbs@ukr.net, ORCID 0000-0002-6475-0623

^{3*}Dep. «Construction, Track and Cargo-Handling Machines», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Square, 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 10 72, e-mail vstef@ukr.net, ORCID 0000-0002-7947-2718

^{4*}Dep. «Construction, Track and Cargo-Handling Machines», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Square, 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 10 72, e-mail dmytroonopriychuk@ukr.net, ORCID 0000-0002-6314-3936

^{5*}Dep. «Construction, Track and Cargo-Handling Machines», Ukrainian State University of Railway Transport, Feuerbach Square, 7, Kharkiv, Ukraine, 61050, tel. +38 (057) 730 10 72, e-mail sash.gubin95@gmail.com, ORCID 0000-0001-8451-5236

DEVELOPMENT ANALYSIS OF MAIN DEFECTS AND THEORETICAL FORECAST OF RAIL SERVICE LIFE IN THE CONDITIONS OF LUBRICATION

Purpose. The study is aimed at identifying the patterns of the load influence on the rail and the parameters of the two-layer lubrication on the development of the main rail defects, namely, lateral wear in the curved track sections. **Methodology.** To establish the distribution of the main rail defects by type and sections of the track, expert estimates of the track service of the Azerbaijan Railway were used with respect to the results of measurements of defective parameters and rail service life on individual sections. To establish the load influence patterns and the parameters of the two-layer lubrication on the intensity of lateral wear of the rails and their service life in the curves, we used the main provisions of the contact interaction mechanics, as well as tribology and chemmotology. **Findings.** The authors proved: 1) the leading rail defects in the curved track sections are defects associated with low contact fatigue strength of steel, high contact stresses and friction forces along the lateral surface; 2) according to the obtained distribution, the main rail defects in the curves should include: lateral wear of the head, metal shelling along the lateral surface, transverse cracks in the head in the subsurface area; 3) the use of a two-layer lubrication leads to an increase in the actual contact area of the wheel and the rail, a decrease in the contact pressure on the rail, and in aggregate, to a decrease in lateral wear and an increase in the rail service life. **Originality.** The authors first

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

systematized the results of measurements of the rail defects parameters in curves and, on this basis, obtained a distribution of the main defects depending on the curve radius. The authors improved the mathematical model for calculating the service life of rails in curves, which, unlike the existing ones, takes into account the thickness of the lubricating film and the concentration of the solid anti-friction additive in the oil when lubricating the lateral surface. **Practical value.** The obtained results allow us to perform predictive calculations of the rail service life in curved sections depending on the load from the wheel for different operating conditions, namely, with dry contact of the wheel with the rail and in the conditions of their two-layer lubrication. The implementation of two-layer lubrication in railway transport, taking into account the influence of the studied parameters, will lead to an increase in the rail service life in the curves by 55%, 50% and 45% with an estimated rolling stock mass of 60, 70 and 80 tons.

Keywords: railway transport; rail; car; wheel; contact; load; defect; lateral wear; resource; lubrication

REFERENCES

1. Balanovskij, A. E. (2011). *Konec sistemy koleso-rel's i vnov' nachalo*: monohrafiia. Irkutsk: Irkutsk State Technical University. (in Russian)
2. Bohdanov, V. M., & Zakharov, S. M. (2004). Sovremennyye problemy sistemy koleso–rels. *Zheleznye dorogi mira, 1*, 57-62. (in Russian)
3. Voronin, S. V., & Korostelyov, J. M. (2014). The analysis of existing methods of horizontal wear reduction in «wheel-rail» friction pair on curved tracks. *Railway transport information and control systems, 3*, 22-27. (in Russian)
4. Datsyshyn, O. P., Marchenko, G. P., & Glazov, A. Y. (2017). About superficial destruction of heads of railway rails. *Science and transport progress, 4(70)*, 41-49. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/109539> (in Russian)
5. *Klasyfikatsiia ta katalog defektiv i poskodzhen reioik na zaliznytsiakh Ukrainy: TsP-0285, № 050-Ts/od.* (2013). Kyiv. (in Ukrainian)
6. Sosnovskij, L. A. (2003). *Osnovy tribofatiki*. T. 1: Navchalnyi posibnyk. Gomel: Belarusian State University of Transport. (in Russian)
7. Fuks, G. I. (1983). Adsorbciya i smazochnaya sposobnost masel. *Trenie i iznos, 4(3)*, 398-412. (in Russian)
8. Chichinadze, A. V., & Khebda, M. (1990). *Spravochnik po tribotekhnike. T.2 : Smazochnye materialy, tehnika smazki, opory skolzheniya i kacheniya*. Moscow: Mashinostroenie. (in Russian)
9. Keropyan, A., & Gorbatyuk, S. (2016). Impact of Roughness of Interacting Surfaces of the Wheel-Rail Pair on the Coefficient of Friction in their Contact Area. *Procedia Engineering, 150*, 406-410. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.753> (in English)
10. Kuziak, R., & Zygmunt, T. (2012). A New Method of Rail Head Hardening of Standard-Gauge Rails for Improved Wear and Damage Resistance. *Steel Research International, 84(1)*, 13-19. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.201200140> (in English)
11. Ma, L., He, C. G., Zhao, X. J., Guo, J., Zhu, Y., Wang, W. J., ... Jin, X. S. (2016). Study on wear and rolling contact fatigue behaviors of wheel/rail materials under different slip ratio conditions. *Wear, 366-367*, 13-26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.04.028> (in English)
12. Uddin, M. G., Chattopadhyay, G., & Rasul, M. (2013). Development of effective performance measures for wayside rail curve lubrication in heavy haul lines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 228(5)*, 481-495. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409713482678> (in English)
13. Voronin, S., Hrunyk, I., Asadov, B., & Onoprychuk, D. (2018). Study of the process of lubricant application on the friction surface using aerosol lubricators. *International Journal of Engineering & Technology, 7(4.3)*, 20-24. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19546> (in English)
14. Voronin, S., Skoryk, O., Stefanov, V., & Onoprychuk, D. (2017). Study of the predominant defect development in rails of underground systems after preventive grinding and lubrication. *MATEC Web of Conferences, 116*, 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711603005> (in English)

Надійшла до редколегії: 25.11.2019

Прийнята до друку: 27.03.2020