

УДК 539.43:669.018.294

ОЦІНЮВАННЯ ПОШКОДЖУВАНОСТІ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС В УМОВАХ КОНТАКТНОЇ ВТОМИ З УРАХУВАННЯМ ЛОКАЛЬНОГО НАГРІВУ ПОВЕРХНІ КОЧЕННЯ

КУЛИК В. В.^{1*}, *к. т. н., асист.*,
АНДРЕЙКО І. М.², *к. т. н., с. н. с.*,
ВИРА В. В.³, *к. т. н., н. с.*

^{1*} Кафедра прикладного матеріалознавства та обробки матеріалів, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. Устияновича, 5, Львів, 79013, Україна, тел. +38 (032) 258-25-13, e-mail: kulykvolodymyrvolodymyrovych@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5999-3551

² Відділ структурної механіки руйнування матеріалів, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка Національної академії наук України, вул. Наукова, 5, Львів, 79060, Україна, тел. +38 (032) 263-40-28, e-mail: andreiko@ipm.lviv.ua, ORCID ID: 0000-0001-9547-488X

³ Відділ структурної механіки руйнування матеріалів, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка Національної академії наук України, вул. Наукова, 5, Львів, 79060, Україна, тел. +38 (032) 263-40-28; кафедра опору матеріалів та будівельної механіки, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. Карпінського, 6, 79013, Львів, Україна, тел. +38 (032) 258-25-21, e-mail: vira@ipm.lviv.ua, ORCID ID: 0000-0002-5121-7336

Анотація. Постановка проблеми. Актуальним завданням металургійної галузі України є розроблення конкурентоздатних залізничних коліс, що володіють високими експлуатаційними характеристиками без суттєвого підвищення собівартості. Для цього слід удосконалити склад і технологію виробництва колісної сталі для забезпечення оптимального поєднання високого опору зношуванню та високого опору утворенню експлуатаційних дефектів (повзунів і вищербин) на поверхні кочення. **Мета дослідження** – проаналізувати зміну пошкодженості поверхні кочення різних типів коліс за контактної втоми та її зв'язок із циклічною тріщиностійкістю колісних сталей. **Методика.** Експериментували на спеціально спроектованому випробувальному стенді. Випробування проводили на модельних зразках колеса та рейки. Для оцінювання впливу локального нагріву нанесено точкові дефекти контактним зварюванням. Характеристики міцності та циклічної тріщиностійкості визначали за стандартною методикою. Для мікроструктурних досліджень та оцінювання пошкодженості поверхні кочення модельних зразків за контактної втоми використовували оптичний мікроскоп ММР-2Р. Зображення аналізували за допомогою спеціально розробленої програми для оцінювання геометричних розмірів пошкоджень поверхні кочення модельних зразків колісних сталей. **Результати.** Досліджено вплив хімічного складу та модифікування рідкоземельними металами і кальцієм за мінімізованого вмісту алюмінію і титану на структуру колісних сталей та на їх характеристики міцності та циклічної тріщиностійкості. Встановлено залежність пошкодженості поверхні кочення модельних залізничних коліс від характеристик циклічної тріщиностійкості колісних сталей. **Наукова новизна.** Експериментально підтверджено, що схильність сталей до утворення вищербин на поверхні кочення коліс пов'язана з циклічною в'язкістю руйнування сталей. **Практична значимість.** Запропоновано новий підхід до створення (вибору) високоміцних сталей для залізничних коліс. Він базується на діаграмах експлуатаційної надійності колісних сталей, що поєднують підвищені характеристики зносостійкості і опору утворенню вищербин в умовах контактної втоми.

Ключові слова: колісна сталь; міцність; циклічна тріщиностійкість; мікроструктура; вищербини; експлуатаційна надійність; модифікування рідкоземельними металами і кальцієм; мінімізований вміст алюмінію і титану

ОЦЕНКА ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС В УСЛОВИЯХ КОНТАКТНОЙ УСТАЛОСТИ С УЧЕТОМ ЛОКАЛЬНОГО НАГРЕВА ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ

КУЛИК В. В.^{1*}, *к. т. н., ассист.*,
АНДРЕЙКО И. М.², *к. т. н., с. н. с.*,
ВИРА В. В.³, *к. т. н., н. с.*

^{1*} Кафедра прикладного материаловедения и обработки материалов, Национальный университет “Львовская политехника”, ул. Устияновича, 5, Львов, 79013, Украина, тел. +38 (032) 258-25-13, e-mail: kulykvolodymyrvolodymyrovych@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5999-3551

² Отдел структурной механики разрушения материалов, Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко Национальной академии наук Украины, ул. Научная, 5, Львов, 79060, Украина, тел. +38 (032) 263-40-28, e-mail: andreiko@ipm.lviv.ua, ORCID ID: 0000-0001-9547-488X

³ Отдел структурной механики разрушения материалов, Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко Национальной академии наук Украины, ул. Научная, 5, Львов, 79060, Украина; кафедра сопротивления материалов и строительной механики, Национальный университет “Львовская политехника”, ул. Карпинского, 6, Львов, 79013, Украина, тел. +38 (032) 258-25-21, e-mail: vira@ipm.lviv.ua, ORCID ID: 0000-0002-5121-7336

Аннотация. Постановка проблемы. Актуальной задачей металлургической отрасли Украины является разработка конкурентоспособных железнодорожных колес, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками без существенного повышения себестоимости. Для этого следует совершенствовать состав и технологию производства колесной стали для обеспечения оптимального сочетания высокого сопротивления износу и высокого сопротивления образованию эксплуатационных дефектов (ползнунов и выщербин) на поверхности катания. **Цель исследования** – проанализировать изменение повреждаемости поверхности катания различных типов колес по контактной усталости и ее связь с циклической трещиностойкостью колесных сталей. **Методика.** Экспериментировали на специально спроектированном испытательном стенде. Испытания проводили на модельных образцах колеса и рельсы. Для оценки влияния локального нагрева нанесли точечные дефекты контактной сваркой. Характеристики прочности и циклической трещиностойкости определяли по стандартной методике. Для микроструктурных исследований и оценки поврежденности поверхности катания модельных образцов в результате контактной усталости использовали оптический микроскоп ММР-2Р. Изображение анализировали с помощью специально разработанной программы для оценки геометрических размеров повреждений поверхности катания модельных образцов колесных сталей. **Результаты.** Исследовано влияние химического состава и модифицирования редкоземельными металлами и кальцием при минимизированном содержании алюминия и титана на структуру колесных сталей и на их прочностные свойства и свойства циклической трещиностойкости. Установлена зависимость поврежденности поверхности катания модельных железнодорожных колес от характеристик циклической трещиностойкости колесных сталей. **Научная новизна.** Экспериментально подтверждено, что склонность сталей к образованию выщербин на поверхности катания колес связана с циклической вязкостью разрушения сталей. **Практическая значимость.** Предложен новый подход к созданию (выбору) высокопрочных сталей для железнодорожных колес. Он базируется на диаграммах эксплуатационной надежности колесных сталей, сочетающих повышенные характеристики износостойкости и сопротивления образованию выщербин в условиях контактной усталости.

Ключевые слова: колесная сталь; прочность; циклическая трещиностойкость; микроструктура; выщербины; эксплуатационная надежность; модифицирование редкоземельными металлами и кальцием; минимизированное содержание алюминия и титана

EVALUATION OF RAILWAY WHEELS DAMAGE UNDER CONTACT FATIGUE TAKING INTO ACCOUNT LOCAL HEATING ROLL SURFACE

KULYK V.V.^{1*}, *Ph. D., Assistant*,
ANDREIKO I.M.², *Ph. D., S. Research Fellow*,
VIRA V.V.³, *Research Fellow*

^{1*} Department of Applied Materials Science and Materials Engineering, National University “Lviv'ska Politechnika”, Ustyianovych str., 5, Lviv, 79013, Ukraine, tel. +38 (032) 258-25-13, e-mail: kulykvolodymyrvolodymyrovych@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5999-3551

² Department of Microstructural Fracture Mechanics of Materials, Karpenko Physico-Mechanical Institute of The National Academy of Sciences of Ukraine, Naukova str. 5, Lviv, 79060, Ukraine, tel. +38 (032) 263-40-28, e-mail: andreiko@ipm.lviv.ua, ORCID ID: 0000-0001-9547-488X

³ Department of Microstructural Fracture Mechanics of Materials, Karpenko Physico-Mechanical Institute of The National Academy of Sciences of Ukraine, Naukova str. 5, Lviv, 79060, Ukraine; Department of Bridges and Structural Mechanics, National University “Lviv'ska Politechnika”, Karpinskyy str. 6, Lviv, 79013, Ukraine, tel. +38 (032) 263-40-28, e-mail: vira@ipm.lviv.ua, ORCID ID: 0000-0002-5121-7336

Abstract. Problem definition. Developing the competitive production technology of high performance rail wheels without significant cost increase is an up-to-done task for the metallurgy of Ukraine. Chemical This composition of a wheel steel and its production technology should be improved in order to provide optimal combination of its high wear resistance as well as the high resistance against the formation of operational defects (sliders and caves) on the rolling surface. **Purpose of the study.** Analyzing changes in damaging the rolling surfaces for various types of rail wheels at the conditions of contact fatigue as well as revealing the relationship between the damages and the cyclic crack growth resistance of the wheel steels. **Methodology.** The tests were performed on a specially designed stand. Steel samples modeling the wheel and the rail were used. Spot defects were initiated by contact welding to evaluate the influence of local heating. The strength and cyclic crack growth resistance characteristics were determined by the standard methods. Microstructural surface morphology of the specimens and their rolling surface damages were studied using optical microscope MMP-2P. The images were analyzed using a specially developed program for evaluating the geometric sizes of rolling surface damages on the modeling samples of the wheel steels. **Results.** The influence of the chemical composition of wheel steels and their modification by rare earth metals and by calcium with simultaneous minimization of aluminum and titanium contents, on structure of the steels and their strength and cyclic crack growth resistance characteristics has been studied. The dependence of damaging the rolling surfaces of the modeling rail wheels on the cyclic crack growth resistance characteristics of these steels was

established. *Scientific novelty*. It is experimentally confirmed, that steels liability to formation of shelling on the wheel rolling surface is related to cyclic fracture toughness of steels. *Practical significance*. The new approach is proposed for the formation (choice) of high-strength steels for railway wheels. It is based on the diagram of in-service reliability of wheel steels, combining the improved characteristic of wear resistance and resistance to shelling formation in the contact fatigue conditions.

Keywords: wheel steel; strength; cyclic crack resistance; microstructure; shelling; operational reliability; modification by rare earth metals and calcium; minimized of aluminum and titanium content

Вступ

У світі щорічно виготовляється 5,4 млн вагонних коліс (країни СНД – 1,92 (в тому числі Україна – 0,55); Азія – 1,43; Північна Америка – 1,21; Європа – 0,63; Південна Америка – 0,12; Австралія – 0,06; Африка – 0,03) [1].

Єдиним в Україні та третім у світі за масштабами виробництва суцільнокатаних залізничних коліс є Нижньодніпровський трубопрокатний завод (ВАТ “Інтерпайп НТЗ”). Його колеса експортуються в 60 країн світу, серед них найбільші залізничні перевізники, вагонобудівні компанії та ремонтні підприємства Європи, Північної Америки, Азії, країн СНД, зокрема, такі як RAFFIL (Німеччина), Bombardier (Великобританія), Крюковський (Україна), Гомельський (Білорусія), Уральський і Барнаульський (Росія) вагонобудівні заводи та багато інших.

Строк служби залізничних коліс в основному визначається властивостями поверхні кочення та гребеня колеса і залежить від кількості переточувань та величини шару, що при цьому знімається, з метою усунення дефектів поверхні кочення. На технічне обслуговування колісних пар, пов'язане з відновленням профілю поверхні кочення та заміною зношених або пошкоджених коліс, витрачають близько 30 % усіх коштів служб рухомого складу залізниці [2].

Інтенсифікація транспортних перевезень спричинила зростання навантаження на вісь і опосередковано внесла дисбаланс у систему колеса – рейка, пов'язаний з недостатньою міцністю колеса. Найпростіше підвищити міцність (твердість) коліс – збільшити в них уміст вуглецю. Цим шляхом пішли більшість розробників коліс, зокрема, на ВАТ “Інтерпайп НТЗ” освоїли випуск нових коліс підвищеної міцності типу КП-Т. Як показала практика експлуатації, їх ресурс підвищився за критерієм зносостійкості на 30...40 % [3]. Проте у ряді випадків він скоротився порівняно з традиційно використовуваними колесами типу КП-2 за критерієм пошкоджуваності поверхні кочення, зокрема, повзунів і вищербин (протокол наради у заст. генерального директора Укрзалізниці від 20.01.2009 р.). Перерозподіл пошкоджуваності з понаднормового зношування гребеня до переважно вищерблювання, спричиненого контактною втомою та підвищенням витрат на обробку різанням показав безперспективність подальшого

нарощування міцності сталей шляхом підвищення вмісту вуглецю.

Тому актуальним завданням металургійної галузі України стало розроблення конкурентоздатних залізничних коліс, що володіють високими експлуатаційними характеристиками без суттєвого підвищення собівартості. Для цього слід удосконалювати склад і технологію виробництва колісної сталі для забезпечення оптимального поєднання високого опору зношуванню та високого опору утворенню експлуатаційних дефектів (повзунів і вищербин) на поверхні кочення. Аналіз попередніх досліджень показує [4; 5], що контактно-втомна пошкоджуваність поверхні кочення залізничних коліс визначається опором зародженню і поширенню втомних тріщин.

Мета роботи – проаналізувати зміну пошкоджуваності поверхні кочення різних типів коліс за контактною втомою та її зв'язок із циклічною тріщиностійкістю колісних сталей.

Матеріал та методика досліджень

Досліджували зразки колісних сталей марок 2 (0,58 % С) і Т (0,63 % С) (ГОСТ 10791-2011), вирізаних із коліс дослідно-промислового виробництва (типу КП-Т) і поточного виробництва (типу КП-2), а також сталь варіанта Т_м (сталь марки Т (0,66 % С), модифікована РЗМ і Са за мінімізованого вмісту алюмінію (0,023 %) та титану (0,006 %)).

Випробування проводили на модельних зразках колеса та рейки (рис. 1 а, б), габаритні розміри яких становили: товщина 8 мм, діаметр 40 мм і довжина 220 мм, ширина 8 мм, висота 16 мм, відповідно.

Для оцінювання впливу локального нагріву на пошкоджуваність модельних зразків за контактною втомою на їх поверхні кочення наносили контактним зварюванням пару точкових дефектів, розміщених діаметрально протилежно.

Експериментували на спеціально спроектованому випробувальному стенді [7] з контролем навантаження тензометричною балкою (динамометр Д1) та сили тертя тензометричною скобою (динамометр Д2). Одна з найпривабливіших функцій випробувального стенда – це поступально-зворотний хід повзуна, що забезпечує кочення колеса рейкою під навантаженням тільки в одному напрямку.

Дослідження проводили за навантаження на колесо $P = 130$ кг, тоді напруження в зоні контакту пари колесо – рейка становили [6]:

$$P_0 = 0,5642 \sqrt{\frac{P}{\eta \cdot b \cdot R}} = 0,5642 \sqrt{\frac{130 \text{ кг}}{0,91 \cdot 10^{-4} \frac{\text{мм}^2}{\text{кг}} \cdot 8 \text{ мм} \cdot 20 \text{ мм}}} = 53 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2} \cdot$$



a



б (b)

Рис. 1. Модельні зразки колеса (а) і рейки (б) / Fig. 4. Modelling samples of a wheel (a) and a rail (b)

Зображення аналізували за допомогою спеціально розробленої програми для оцінювання геометричних розмірів пошкоджень поверхні кочення модельних зразків колісних сталей.

Короткочасну міцність і пластичність визначали п'ятиразово на циліндричних зразках із діаметром робочої частини 3 мм. Циклічну тріщиностійкість (ЦТ) сталей визначали за діаграмами швидкостей росту втомної макротріщини – залежностями $da/dN - \Delta K$ [8], отриманими на компактних (СТ) зразках базового розміру $W = 40$ мм і товщиною 11 мм за частоти 10...15 Гц і коефіцієнта асиметрії циклу навантаження $R = 0,1$ у повітрі за 20 °С. Довжину втомної тріщини виміряли катетометром КМ-6 за 25-кратного збільшення з похибкою $\pm 0,02$ мм.

Характеристиками ЦТ матеріалів вибрано поріг втоми $\Delta K_{th} = \Delta K_{10}^{-10}$ та циклічну в'язкість руйнування $\Delta K_{fc} = \Delta K_{10}^{-5}$ – розмахи коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) за швидкості росту тріщини $da/dN = 10^{-10}$ і 10^{-5} м/цикл відповідно, а також величини ΔK^* і n – параметри рівняння Паріса для середньоамплітудної ділянки діаграми [8].

Для мікроструктурних досліджень та оцінки пошкодженості поверхні кочення модельних зразків за контактної втоми використовували оптичний мікроскоп ММР-2Р.

Результати випробувань та їх обговорення

Стандартні механічні випробування показали, що сталь варіанта T_m має межу міцності $\sigma_B = 1150...1160$ МПа, відносне видовження $\delta = 13...14$ % і твердість – 339НВ (табл.), що відповідає вимогам ГОСТ 10791-2011 до сталей високоміцних залізничних коліс. Вона дещо поступається міцністю сталі варіанта T , проте переважає її за пластичністю δ і твердістю. Така особливість цієї сталі – одночасне підвищення і твердості і пластичності, пов'язана з її модифікуванням, що зумовило формування рівномірної структури виливки, зокрема, усунення лікваций перлітно-феритної фази та зменшення кількості неметалевих включень, а також значне подрібнення цементитної фази.

Таблиця

Механічні властивості колісних сталей / The mechanical properties of the wheel steels

№ за/п	Варіант сталі	$\sigma_{0,2}$		σ_B	$\delta, \%$	НВ	Характеристики циклічної тріщиностійкості			
		МПа					ΔK_{th}	ΔK^*	ΔK_{fc}	n
		МПа· $\sqrt{м}$								
1	2	1010	870	12	302	7,0	30	100	3,2	
2	T	1250	1080	11	321	6,6	28	65	3,1	
3	T_m	1160	815	14	339	6,6	28	42	3,1	

Досліджувані колісні сталі мають перлітно-феритну структуру (рис. 2). Легування сталей варіантів T і T_m ванадієм зумовлює помітне подрібнення їх мікроструктури (рис. 2 б, в).

Сталь варіанта T_m має структуру високодисперсного перліту без виділень надлишкового фериту (рис. 2 в) порівняно зі сталлю

варіанта T , яка має структуру крупнодисперсного перліту з виділеннями надлишкового фериту (рис. 2 б).

Оцінюючи характеристики циклічної тріщиностійкості досліджуваних колісних сталей, слід зауважити, що за низьких і середніх амплітуд навантаження різниця між ними практично відсутня.

За пороговою циклічною тріщиностійкістю ΔK_{th} , показником рівняння Паріса n та K^* модифікована колісна сталь варіанта T_m відповідає колісній сталі варіанта T (без модифікування) та поступається колісній сталі варіанту 2 на 6 %, 3 % та 7 % відповідно (таблиця).

Суттєві відмінності між цими сталями спостерігаються за високих амплітуд навантаження. Найнижчою циклічною в'язкістю руйнування ΔK_{fc} володіє модифікована сталь варіанта T_m , яка на 35 % поступається високоміцній сталі варіанта T та на 58 % середньоміцній сталі варіанта 2.

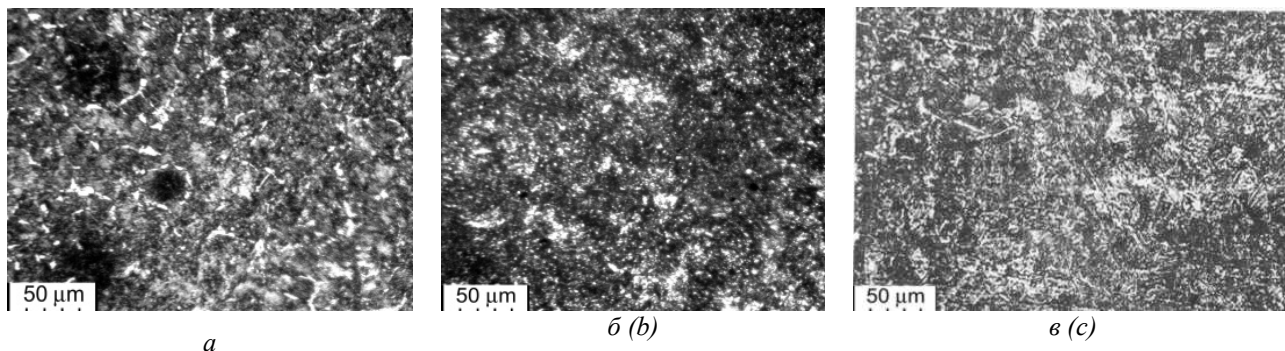


Рис. 2. Мікроструктура колісних сталей варіантів 2 (а), T (б) та T_m (в) / Fig. 2. The microstructure of the wheel steels for variants 2 (a), T (b) and T_m (c)

Дослідження пошкоджуваності за контактної втоми показали (рис. 3), що на поверхні кочення модельних коліс не виявлено дефектів великих розмірів, зокрема, вищербин, сформованих шляхом розшарування. За площею дефекту всі пошкодження вкладаються в діапазон $0,001 \dots 0,05 \text{ мм}^2$.

Аналіз зображення поверхні кочення модельних коліс показав, що пошкоджуваність (загальна площа дефектів) становить 2 %, 5 % та 8 % від загальної

площі поверхні кочення для сталей варіантів 2, T та T_m , відповідно (рис. 4). Найвища пошкодженість поверхні кочення колеса зі сталі варіанта T_m пов'язана з її найнижчою циклічною в'язкістю руйнування (див. табл.) Відповідно найменш пошкодженою поверхнею кочення виявилось модельне колесо зі сталі варіанта 2, яка володіє найвищою серед досліджуваних сталей циклічною в'язкістю руйнування.

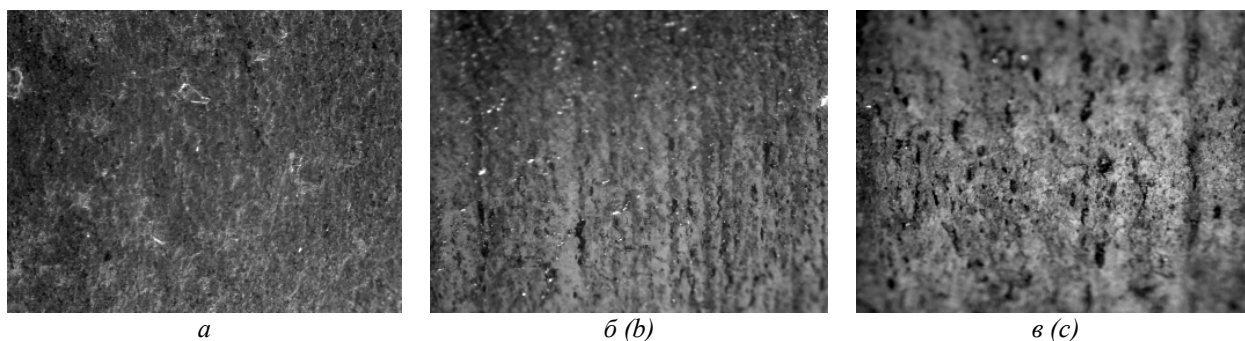


Рис. 3. Поверхні кочення модельних коліс за варіантами 2 (а); T (б); T_m (в) після випробувань на контактну втому, $\times 130$ / Fig. 3. The model wheels rolling surfaces for variants 2 (a); T (b) and T_m (c) after contact fatigue testing, $\times 130$.

Таким чином, установлено, що вищерблювання поверхні кочення модельних коліс визначається у першу чергу циклічною в'язкістю руйнування ΔK_{fc} сталей (рис. 4).

Спостереження показали, що після 200 тисяч циклів навантаження в околі ділянки локального нагріву на поверхні кочення модельних коліс можна виділити три зони (рис. 5). Зона А – поверхня

кочення, яка не зазнала термовпливу, Б – після локального нагріву, В – після термовпливу з вивром матеріалу внаслідок контакту з електродом. Площа вищербин у зоні Б більша порівняно з зоною А, яку детально розглянуто на рисунку 4. Аналогічні тенденції (підвищення вищерблюваності в зонах локального нагріву (повзунів)) спостерігаються в залізничних колесах під час експлуатації. Слід

зазначити, що і в зонах локального нагріву на поверхні кочення модельних коліс спостерігається залежність вищерблованості від циклічної в'язкості руйнування ΔK_{fc} . Так, на межі зон А і Б (рис. 5 б, в) прослідковується утворення великих вищербин, розмір яких обернено пропорційно залежить від величини циклічної в'язкості руйнування ΔK_{fc} .

Вищербини, утворені в зонах термовпливу, більш

небезпечні (завдяки своїм розмірам та особливості структури, яка була піддана локальному нагріву) порівняно з такими, утвореними на поверхні кочення без нього. Порівнюючи розміри вищербин для сталі варіанта T_m , встановили, що вищербина, утворена в зоні термовпливу, понад 25 разів більша за найбільшу вищербину, утворену на поверхні кочення без термовпливу (зона А).

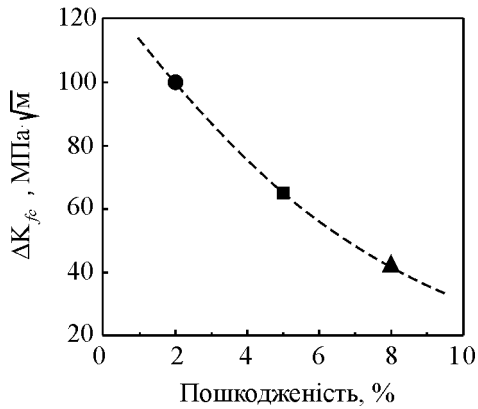


Рис. 4. Залежність пошкодженості поверхні кочення модельних коліс від циклічної в'язкості руйнування ΔK_{fc} : ● – сталі марки 2; ■ – марки T; ▲ – марки T_m / Fig. 4. The dependence of the model wheels rolling surface damages on the cyclic fracture toughness ΔK_{fc} : ● – steel grade 2; ■ – steel grade T; ▲ – steel grade T_m .

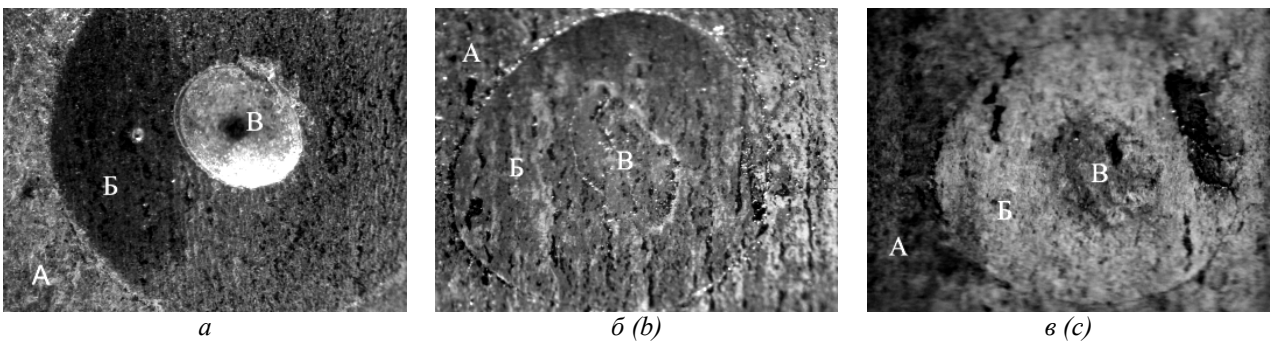


Рис. 5. Поверхні кочення модельних коліс із зонами термовпливу за варіантами 2 (а); T (б); T_m (в) після випробувань на контактну втому, $\times 130$ / Fig. 5. The model wheels rolling surfaces with heat-affected zones for variants 2 (a); T (b) and T_m (c) after contact fatigue testing, $\times 130$

Підсумовуючи вищенаведене, можна стверджувати, що схильність сталей до утворення вищербин на поверхні кочення коліс пов'язана з її циклічною в'язкістю руйнування.

Висновки

1. Експериментально підтверджено, що схильність до формування вищербин на поверхні

кочення колеса пов'язана з циклічною тріщиностійкістю сталей.

2. На підставі отриманих результатів запропоновано новий підхід до створення (вибору) високоміцних сталей для залізничних коліс. Він повинен базуватися на діаграмах експлуатаційної надійності колісних сталей, що поєднують підвищені характеристики зносостійкості і опору утворенню вищербин в умовах контактної втоми.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hondius H. Exploiting synergies in the wheelset market / H. Hondius // *Railway gazette international*. – 2008. – 164, № 10. – Pp. 822–824. – Режим доступу: <http://www.railwaygazette.com/publications/railway-gazette-international/about.html>
2. Cassidy Ph. Perspective materials for production of railway wheels / Ph. Cassidy // *International Railway Journal*. – 2001. – № 12. – Pp. 40–41.
3. Узлов И. Г. Научная разработка и производственная реализация технологии микролегирования и термоупрочнения высокоизносостойких железнодорожных цельнокатаных колес / И. Г. Узлов, К. И. Узлов, О. Н. Перков, А. В. Кныш // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. – 2004. – Вып. 7. – С. 231–243.
4. Панасюк В. В. Нормативи на сталі для суцільнокатаних високоміцних залізничних коліс / В. В. Панасюк, О. П. Остащ, І. М. Андрейко та ін. // *Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин*. – Київ : Інститут електрозварювання ім. Е. О. Патона НАН України, 2012. – С. 594–598.
5. Ostash O.P. On the concept of selection of steels for high-strength railroad wheels / O.P. Ostash, V.H. Anofriev, I.M. Andreiko, L.A. Muradyan, V.V. Kulyk // *Materials Science*. – 2013. – 48, № 6. – Pp. 697–703. – Режим доступу: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11003-013-9557-7>
6. Справочник по триботехнике : справ. пособ. в 3 т. / Под. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. – Москва : Машиностроение; Варшава : ВКЛ, 1989. – 135 с.
7. Андрейко І. Дослідження пошкоджуваності поверхні кочення залізничних коліс / І. Андрейко, В. Кулик, В. Прокопєць. – Київ : *Машинознавство*, 2011. – № 1–2. – С. 32–36. – Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/UJRN/maz_2011_1-2_10
8. *Механика разрушения и прочность материалов : справ. пособ. в 4 т. / О. Н. Романив, С. Я. Ярема, Г. Н. Никифорчин и др. : под общ. ред. В. В. Панасюка*. – Киев : *Наукова думка*, 1988–1990. – Т. 4: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов. – 1990. – 680 с.

REFERENCES

1. Hondius H. Exploiting synergies in the wheelset market. *Railway gazette international*, 2008, 164, no. 10, pp. 822–824.
2. Cassidy Ph. Perspective materials for production of railway wheels. *International Railway Journal*, 2001, no. 12, pp. 40–41.
3. Uzlov I.G., Uzlov K.I., Perkov A.N. and Knysh A.V. *Nauchnaya razrabotka i proizvodstvennaya realizatsiya tekhnologii mikrolegirovaniye i termouprochneniya vysokoiznosostoykikh zheleznodorozhnykh tsel'nokatanykh koles* [Scientific development and production implementation of micro-alloying technology and highly wear thermostrengthening train rolled wheels]. *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii* [Fundamental and Applied problems of the steel industry]. 2004, vol. 7, pp. 231–243. (in Russian).
4. Panasyuk V.V., Ostash O.P., Andreiko I.M. and al. *Normatyvy na stali dlya sutcilnokatanykh vysokomitsnykh zaliznychnykh kolis* [Standards for solid-rolled steel for high railway wheels]. *Problemy resursu i bezpeky ekspluatatsii konstruksiy, sporud i mashyn* [Service life and operational safety constructions, buildings and machines]. Kyiv : Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, 2012, pp. 594–598. (in Ukrainian).
5. Ostash O.P., Anofriev V.H., Andreiko I.M., Muradyan L.A. and Kulyk V.V. On the concept of selection of steels for high-strength railroad wheels. *Materials Science*, 2013, 48, no. 6, pp. 697–703.
6. *Spravochnik po tribotekhnike* [Reference on tribotechnology]. Edited by M. Hedby and A.V. Chichinadze. Moscow : Mechanical Engineering Publ.; Warsaw : VKL Publ., 1989. (in Russian).
7. Andreiko I.M., Kulyk V.V. and Prokopets V.I. *Doslidzhennya poshkodzhuvanosti poverkhni kochennya zaliznychnykh kolis* [Investigation of damaging of railway wheels rolling surface]. *Mashynoznavstvo* [Engineering]. 2011, no. 1–2, pp. 32–36. (in Ukrainian).
8. Romaniv A.N., Yarema S.Ya., Nikiforchin G.N. and al. *Ustalost' i tsiklicheskaya treshchinostoykost' konstruksionnykh materialov* [Fatigue and cyclic crack resistance of structural materials]. *Mekhanika razrusheniya i prochnost' materialov* [Fracture mechanics and strength of materials]. Under the total. ed. V.V. Panasyuk, 1990, Kyiv : *Naukova Dumka Publ.*, 1988–1990, vol. 4, 1990, 680 p.

Стаття рекомендована до публікації д-ром техн. наук, с. н. с. О. І. Бабаченком (Україна); д-ром техн. наук, проф. О. П. Остащом (Україна).

Стаття надійшла до редакції 23.10.2016.

Прийнята до друку 26.10.2016.