

ВПЛИВ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИКЛІЧНОЇ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ КОЛІСНИХ СТАЛЕЙ З НІТРИДНИМ ЗМІЦНЕННЯМ НА ЇХ ПОШКОДЖУВАНІСТЬ В УМОВАХ КОНТАКТНОЇ ВТОМИ

© Кулик В. В., 2017

Досліджено взаємозв'язок між утворенням вищербин на поверхні кочення модельних коліс і циклічною тріщиностійкістю сталей з нітридним зміцненням. Показано, що нітридне зміцнення колісних сталей позитивно впливає на опір пошкодженості поверхні кочення модельних коліс. Для підвищення роботоздатності колісних сталей з нітридним зміцненням зазначена необхідність оптимізації їх хімічного складу, забезпечуючи вміст вуглецю в інтервалі 0,50...0,55 % за вмісту ванадію 0,08...0,12 % і азоту 0,008...0,015 %.

Ключові слова: колісна сталь, нітридне зміцнення, міцність, циклічна тріщиностійкість, вищербини, експлуатаційна надійність.

INFLUENCE OF FATIGUE CRACK GROWTH RESISTANCE CHARACTERISTICS OF WHEEL STEELS WITH NITRIDE STRENGTHENING ON THEIR DAMAGE RESISTANCE UNDER CONTACT FATIGUE

The relationship between spalling formation on model wheels tread surface and cyclic fracture toughness of steels with nitride strengthening is study. It is shown that the nitride strengthening of wheel steels has a positive influence on damage resistance of surface rolling of model wheels. To improve the serviceability of wheel steels with nitride strengthening indicated the need to optimize their chemical composition providing content of carbon in the range of 0.50...0.55 %, vanadium – 0.08...0.12 % and nitrogen – 0,008...0,015 %.

Key words: wheel steel, nitride strengthening, strength, cyclic crack resistance, spalling, operational reliability.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій. Значна кількість пошкоджень елементів пар кочення формується за допомогою поширення тріщин під час їх контактування. Ці тріщини ростуть вздовж криволінійних траєкторій, формуючи різноманітні типи пошкоджень, які ініціюють ріст магістральних тріщин, що призводить до руйнування контактуючого тіла. Тому розроблено безліч моделей, які описують ці процеси якісно та кількісно [1–4]. Виробники залізничних коліс прагнуть підвищити період між репрофілізацією коліс та покращити безпеку колісних пар, руйнування яких призводить до великих економічних витрат, а подекуди і до смертельних випадків [5–6]. Контактна втома та вищербини на поверхні кочення стали головними факторами, які потрібно враховувати для збільшення часу міжремонтних інтервалів рухомого складу. Сьогодні, за різними оцінками, близько 80 % коліс репрофілювано у зв'язку з контактною втомою та вищерблюваністю, що потрібно враховувати під час вибору колісних сталей [7]. Тому ресурс залізничних коліс залежить від опору зношуванню та опору руйнуванню, що викликано тріщиноутворенням на їхній поверхні кочення [8]. Накопичення втомних пошкоджень значно скорочує ресурс залізничних коліс. У зв'язку зі зростанням осьових

навантажень та швидкостей руху проводиться оптимізація коліс. Сталі для нового покоління високоміцних залізничних коліс повинні мати високі зносостійкість (твердість) та опір утворенню дефектів типу вищербин на їхній поверхні кочення [8]. Колісні сталі з підвищеним вмістом вуглецю дають змогу забезпечити зносостійкість [9], проте зумовлюють тріщиноутворення (вищерблювання) на поверхні кочення, особливо після гальмування, внаслідок сприятливих умов для мартенситного перетворення у зоні контакту колесо-рейка [10]. Тому розроблена концепція вибору (розроблення) колісних сталей [8] передбачає необхідність зниження вмісту вуглецю у колісній сталі за умови компенсації втрати їх міцності (від зниження вмісту вуглецю) шляхом дисперсійного зміцнення різними вторинними фазами. Одним із напрямків вирішення цієї проблеми є використання нітридного зміцнення.

Формулювання мети дослідження. Мета роботи – оцінити роботоздатність колісних сталей з нітридним зміцненням на підставі залежностей між контактено-втомною пошкоджуваністю поверхні кочення модельних коліс з цих сталей та їх циклічною тріщиноустійкістю.

Викладення основного матеріалу дослідження. Проведено дослідження колісних сталей різного хімічного складу з мікролегуванням ванадієм та азотом. Хімічний склад та механічні властивості досліджуваних сталей наведено у таблиці.

Короткочасну міцність і пластичність визначали на п'ятикратних циліндричних зразках з діаметром робочої частини 3 мм, а циклічну тріщиноустійкість – на компактних зразках з крайовою тріщиною (базовий розмір $W = 40$ мм, товщина $t = 10$ мм) за частоти 10...15 Гц і коефіцієнта асиметрії $R = 0,05$ циклу навантаження у повітрі за температури 20 °С. Довжину втомної тріщини виміряли катетометром КМ-6 з 25-кратним збільшенням у момент, коли її вершина була у матриці.

Хімічний склад та статичні механічні властивості колісних сталей

Вар. сталі	Хімічний склад, мас. %								Механічні властивості			
	C	Si	Mn	Cr	V	N	S	P	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	НВ
									МПа		%	
C ₁	0,64	0,49	1,09	0,14	0,11	0,0079	≤0,03	≤0,03	1005	633	19,3	300
C ₂	0,28	0,47	1,12	0,55	0,21	0,0157	≤0,03	≤0,03	816	447	15,3	281
C ₃	0,50	0,60	1,17	0,40	0,26	0,0159	≤0,03	≤0,03	966	576	15,8	295

Залежності швидкості росту втомної тріщини $V = da/dN$ від розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK будували за відомою методикою [11]. Характеристиками циклічної тріщиноустійкості матеріалів вибрано величини $\Delta K_{th} = \Delta K_{10^{-10}}$ – у низько- і $\Delta K_{fc} = \Delta K_{10^{-5}}$ – у високоамплітудній ділянках діаграми – розмахи коефіцієнта інтенсивності напружень за швидкості поширення тріщини, що дорівнює 10^{-10} та 10^{-5} м/цикл, відповідно [11].

Пошкодженість поверхні кочення досліджували на модельних зразках колеса та рейки, габаритні розміри яких становили: товщина 8 мм, діаметр 40 мм і довжина 220 мм, ширина 8 мм, висота 16 мм, відповідно. Експериментували на спеціально спроектованому випробувальному стенді [12] з контролем навантаження тензометричною балкою та сили тертя тензометричною скобою під час навантаження на колесо $P = 130$ кг, тоді напруження у зоні контакту пари колесо-рейка становили $P_0 = 750$ МПа [12]. Однією з найпривабливіших функцій випробувального стенда є поступально-зворотний хід повзуна, що забезпечує кочення колеса рейкою під навантаженням тільки в одному напрямку. Поверхні зразків модельних коліс вивчали під мікроскопом після 200000 циклів навантаження. Зображення аналізували за допомогою спеціально розробленої програми для оцінювання геометричних розмірів пошкоджень поверхні кочення модельних зразків колісних сталей.

Оцінюючи характеристики циклічної тріщиностійкості досліджуваних колісних сталей, потрібно зауважити, що за низьких і середніх амплітуд навантаження різниця між ними відсутня. Істотні відмінності між цими сталями спостерігаються за високих амплітуд навантаження (рис. 1). Їхня циклічна в'язкість руйнування змінюється більш ніж у 2 рази. Найнижчу циклічну в'язкість руйнування ΔK_{fc} має сталь мікролегована 0,26 % V та модифікована 0,0159 % N за вмісту 0,50 % C. Найвище значенням ΔK_{fc} має сталь мікролегована 0,21 % V та модифікована 0,0157 % N за вмісту 0,28 % C. Потрібно зазначити, що за циклічною в'язкістю руйнування ΔK_{fc} досліджувані сталі не поступаються сталям високоміцних залізничних коліс, а у деяких випадках виявилися значно кращими за них (рис. 1).

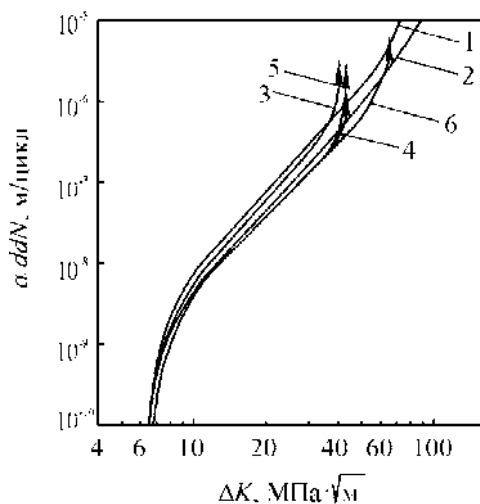


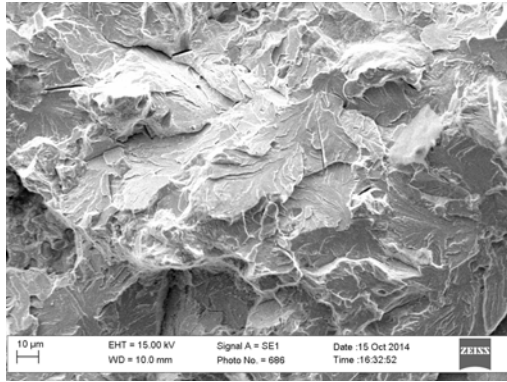
Рис. 1. Діаграми швидкостей росту втомної макротріщини у сталях:
 1 – варіант сталі C_1 ; 2 – C_2 ; 3 – C_3 ;
 4–6 – сталі високоміцних залізничних коліс [13].
 Стрілками вказано момент спонтанного руйнування,
 коли $DK = \Delta K_{fc}$

Такий результат узгоджується з даними мікрофактографічного аналізу (рис. 2). Він показує, що в умовах субкритичного росту втомної макротріщини у сталі C_3 попри низьку циклічну в'язкість руйнування, що спровокована переважно скольним механізмом руйнування та подекуди елементами міжзеренного руйнування, мікромеханізм втомного руйнування доволі енергомісткий, у зламі достатня кількість деформаційних гребенів внаслідок в'язкого руйнування окремих мікрооб'ємів сталей (рис. 2, в). У сталі C_1 дещо зростає кількість деформаційних гребенів (рис. 2, а) порівняно зі сталлю C_3 , а також відсутні елементи міжзеренного руйнування, що відображається на підвищенні циклічної в'язкості руйнування. Найвище значення ΔK_{fc} встановлено у сталі C_2 , що відобразилося на доволі енергомісткому мікромеханізмі руйнування (рис. 2, б).

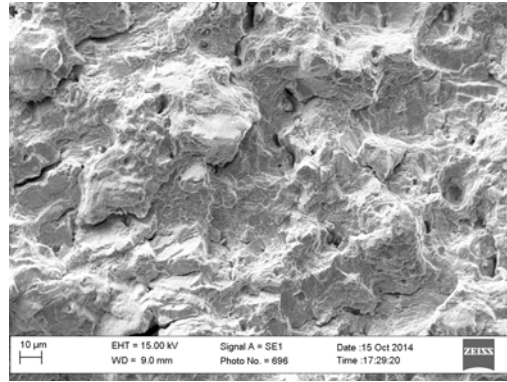
Проведені експериментальні дослідження пошкоджуваності показали (рис. 3), що на поверхні кочення модельних коліс не виявлено дефектів великих розмірів, сформованих під час розшарування.

Усі пошкодження вкладаються (за площею дефекту) у діапазон 0,001...0,05 мм² (рис. 4). Для сталей з нітридним зміцненням спостерігається аналогічна картина, як і для відомих колісних сталей [13]. Найдефектнішою виявилася сталь C_3 , яка має найнижчу циклічну в'язкість руйнування. Найменш пошкодженим виявилось модельне колесо зі сталі марки C_2 , де $\Delta K_{fc} = 87 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (рис. 3).

Узагальнюючи отримані результати характеристик циклічної тріщиностійкості та пошкоженості (площі усіх дефектів на поверхні кочення) модельних коліс з різних сталей (рис. 5), можна однозначно стверджувати, що пошкоженість поверхні кочення залежить від циклічної в'язкості руйнування [13]. Також потпібно зробити наголос та тому, що нітридне та карбонітридне зміцнення позитивно впливає на опір пошкоженості поверхні кочення модельних коліс (рис. 5, лінія 2 проти лінії 1). Для підвищення роботоздатності колісних сталей з нітридним зміцненням необхідно оптимізувати їх хімічний склад, забезпечуючи вміст вуглецю в інтервалі 0,50...0,55 % за вмісту ванадію 0,08...0,12 % і азоту 0,008...0,015 %.

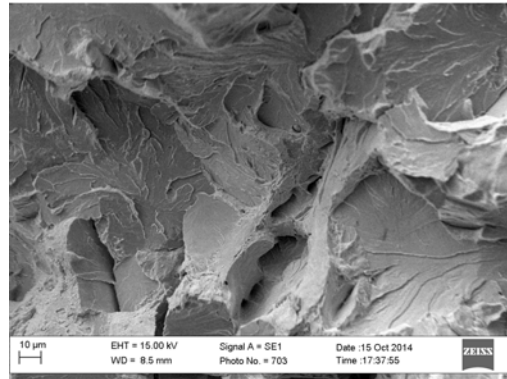


a

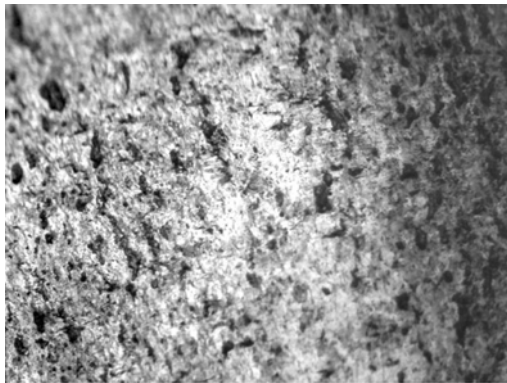


б

Рис. 2. Мікрофрактограми зразків досліджуваних сталей за $da/dN = 10^{-6}$ м/цикл: а – варіант сталі C_1 ; б – C_2 ; у – C_3



в



a



б

Рис. 3. Поверхні кочення модельних коліс зі сталей з нітридним зміцненням за варіантами сталей C_1 (а); C_2 (б); C_3 (в) після випробувань на контактну втому (збільшення $\times 130$)



в

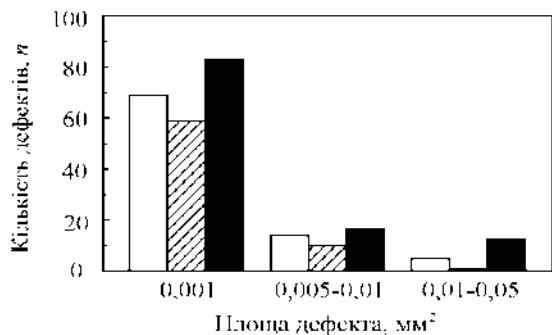


Рис. 4. Розподіл кількості дефектів різної площі на поверхні кочення модельних зразків зі сталі C₁ (□), C₂ (▨), та C₃ (■)

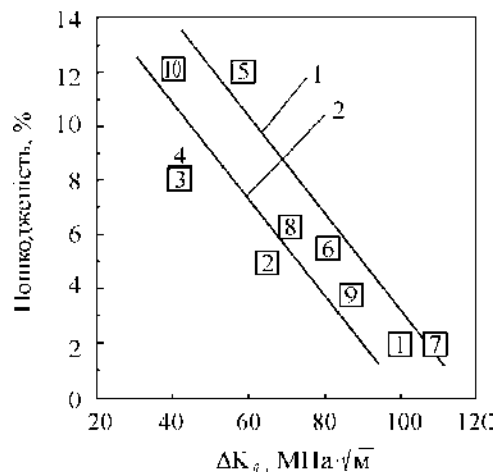


Рис. 5. Залежність пошкодженості поверхні кочення модельних коліс від циклічної в'язкості руйнування ΔK_{fc} : 1–4 сталі залізничних коліс [13]; 5–7 – сталь 65Г з різною термообробкою [14]; 8 – C₁ (згідно з табл. 1); 9 – C₂; 10 – C₃

Висновки. Встановлено залежність між утворенням вищербин на поверхні кочення модельних коліс і циклічною тріщиностійкістю сталей з нітридним зміцненням. Отримані результати показали, що нітридне зміцнення колісної сталі позитивно впливає на опір пошкодженості поверхні кочення модельних коліс.

1. Ekberg A. Fatigue of railway wheels and rails under rolling contact and thermal loading – an overview / A. Ekberg, E. Kabo // *Wear*. – 2005. – 258. – P. 1288–1300. 2. Zerbst U. Fracture mechanics in railway applications – an overview / U. Zerbst, K. Madler, H. Hintze // *EFM* – 2005. – 72. – P. 163–194. 3. Panasyuk V. V. To crack propagation theory under rolling contact / V. V. Panasyuk, O. P. Datsyshyn, H. P. Marchenko // *Eng. Fract. Mech.* – 1995. – 52, № 1. – P. 179–191. 4. Datsyshyn O. P. Modelling of fatigue contact damages formation in rolling bodies and assesment of their durability / O. P. Datsyshyn, V. V. Panasyuk, Yu. Glazova // *Wear*. – 2011. – 271, Is. 1–2. – С. 186–194. 5. Richardetal H. A. Fracture in a rubber-sprung railway wheel / H. A. Richarda, M. Fulland, M. Sander, G. Kullmer // *Engineering Failure Analysis*. – 2005. – 12. – P 986–999. 6. Richardetal H. A. Development of fatigue crack growth in real structures / H. A. Richarda, M. Sander, M. Fulland, G. Kullmer // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2008. – 75. – P. 331–340. 7. Clarke M. Wheel rolling contact fatigue and rim defects investigation wheel steels handbook / M. Clarke // *Research Programme; Engineering : Rail Safety & Standart Board. Research*. – P. 20. 8. 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. – P. 697–703. 9. 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 прикл. проблемы черной металлургии*. – 2004. – Вып. 7. – С. 231–243. 10. Ostash O. P. Influence of braking on the microstructure and mechanical behavior of steels of railroad wheel / O. P. Ostash, I. M. Andreiko, V. V. Kulyk, V. I. Vavrukh // *Materials Science*. – 2013. – № 5, 48. – P. 569–574. 11. Механика разрушения и прочность материалов: справ. пособие у 4-х т. – Т. 4: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О. Н. Романив [и др.]; под общ. ред. В. В. Панасюка. – К.: Наук. думка, 1990. – 680 с. 12. Андрейко І. М. Дослідження пошкоджуваності поверхні кочення залізничних коліс / І. М. Андрейко, В. В. Кулик, В. І. Прокопець // *Машинознавство*. – 2011. – № 1–2. – С. 32–36. 13. Кулик В. В. Оцінка пошкоджуваності залізничних коліс в умовах контактної втоми з врахуванням локального нагріву поверхні кочення / В. В. Кулик, І. М. Андрейко, В. В. Віра // *Металознавство та термічна обробка металів*. – 2016. – № 4. – С. 39–45. 14. Осташи О. П. Зв'язок між пошкоджуваністю поверхні кочення залізничних коліс та циклічною тріщиностійкістю сталей / О. П. Осташи, В. В. Кулик, Т. М. Ленковський // *Дванадцятий Міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові: тези доп.* – Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2015. – С. 6–7.