

УДК 539.43:669.018.294

## ВПЛИВ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ФАКТОРІВ НА РОБОТОЗДАТНІСТЬ ГРАФІТИЗОВАНОЇ СТАЛІ

*В. В. КУЛИК, І. М. АНДРЕЙКО, В. І. ВАВРУХ*

*Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів*

Порівняно закономірності впливу високих (до 800°C) і низьких (до –40°C) температур та корозивного середовища на механічні характеристики графітизованої сталі і відомих колісних марок 2 і Т. Виявлено, що зниження температури аустенізації і стрімке зростання високотемпературної пластичності сталей забезпечують сприятливіші умови для утворення дефектів типу повзун на поверхні кочення залізничних коліс. Встановлено, що графітизована сталь за низьких температур (до –40°C) не схильна до низькотемпературного окрихчення, а корозивне середовище не впливає на її циклічну тріщиностійкість.

**Ключові слова:** *графітизована сталь, колісна сталь, висока і низька температури, корозивне середовище, міцність, пластичність, циклічна тріщиностійкість.*

Інтенсифікація залізничних перевезень пов'язана зі зростанням швидкостей для пасажирського і тоннажності для вантажного рухомих складів, що ставить нові вимоги до конструкційних матеріалів, зокрема, до їх міцності і в'язкості руйнування, а також опірності впливу експлуатаційних факторів. Однією з основних причин виходу з ладу рухомого складу залізничного транспорту стало понаднормове зношування та пошкодженість (повзуни і вищербини) поверхні кочення суцільнокатаних коліс, через що суттєво підвищилися витрати на утримання вантажних вагонів [1, 2]. Повністю усунути зношування і дефекти в зоні контакту колесо–рейка неможливо, проте знизити його інтенсивність можна шляхом вдосконалення профілю поверхні кочення колеса, оптимізації співвідношення твердості колеса і рейки, а також підвищуючи зносотривкість і тріщиностійкість колісних сталей [3].

Перспективними для виробництва високоміцних залізничних коліс видаються графітизовані сталі (ГС). Завдяки включенням графіту вони повинні збільшити основні ресурсні характеристики колісної сталі: зносотривкість за достатнього рівня циклічної тріщиностійкості, теплопровідність і термотривкість [4], що знизить пошкодженість поверхні кочення залізничних коліс, тобто продовжить їх термін експлуатації [3]. Дані про вплив експлуатаційних факторів (зокрема, високих і низьких температур та корозивного середовища) на роботоздатність ГС у літературі практично відсутні. Мета дослідження – порівняти зміну механічних характеристик ГС і відомих колісних сталей залежно від температури випробування та впливу корозивного середовища.

**Матеріал і методики.** Вивчали доевтектоїдну ГС (0,60 mass.% C; 0,90 Mn; 1,0 Si; 1,0 Cu; 0,15 Al) після відпалу на зернистий перліт, яку порівнювали з відомими колісними сталями марок 2 і Т після гартування і відпуску [5–7].

Короточасну міцність і пластичність визначали на п'ятикратних циліндричних зразках з діаметром робочої частини 3 mm за температур від 20 до 800°C.

Циклічну тріщиностійкість сталей вивчали за діаграмами швидкостей росту втомної макротріщини – залежностями  $da/dN-\Delta K$  [8], отриманими на компактних (СТ) зразках базового розміру  $W = 40$  mm і товщиною 11 mm за частоти 10...15 Hz і коефіцієнта асиметрії  $R = 0,1$  циклу навантаження у повітрі при 20°C і у парах рідкого азоту при -40°C, а також у 3,5%-му водному розчині NaCl при 20°C. Довжину втомної тріщини виміряли катетометром КМ-6 за 25-кратного збільшення з похибкою  $\pm 0,02$  mm.

Характеристиками циклічної тріщиностійкості матеріалів вибрали 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  $10^{-5}$  m/cycle відповідно, а також величину  $V_{\Delta K}$  – значення  $da/dN$  за заданого розмаху  $\Delta K$ , що описує середньоамплітудну ділянку діаграми [8]. За низьких температур параметр  $\Delta K_{fc}$  встановили за розмахом  $\Delta K$ , коли втомна тріщина росте спонтанно.

**Результати досліджень та їх обговорення. Високотемпературна міцність і пластичність.** Закономірності утворення дефектів типу повзун на поверхні кочення коліс залежать від високотемпературних властивостей сталей [9]. Температурні залежності границь міцності  $\sigma_B$  і текучості  $\sigma_{0,2}$  ГС та колісних сталей (рис. 1a, b) можна розділити на три ділянки: в інтервалі температур випробувань від кімнатної до 300°C, від 300 до 700°C та від 700°C і вище. На першій і третій ділянках фіксуємо тенденцію, коли механічні характеристики мало залежать від температури випробування, на другій з підвищенням температури вони знижуються. При цьому відзначимо деякі особливості. Починаючи з температури 300°C, падіння границь міцності і, особливо, текучості пришвидшене для високоміцної сталі марки Т, з досягненням температури випробування близько 700°C вони стають сумірними з відповідними характеристиками для середньоміцної сталі марки 2 та дещо нижчими, ніж для ГС. Границі міцності і текучості цих сталей знижуються у 7–11 разів. Зміна відносного видовження не настільки однозначна (рис. 1c). Зокрема, при 500...525°C відносне видовження для колісних сталей починає стрімко зростати, особливо для сталі марки Т. Якщо до температури випробувань 550°C високоміцна сталь за пластичністю поступається середньоміцній на 4%, то з під-

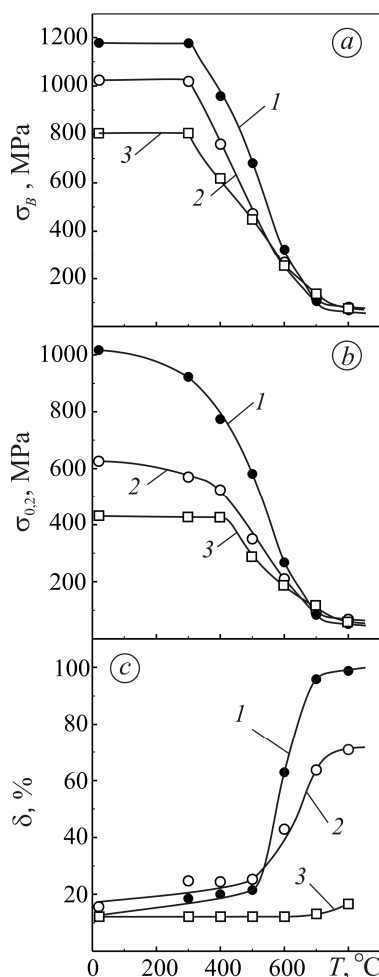


Рис. 1. Залежності границь міцності (a) та текучості (b), а також відносного видовження (c) від температури випробувань: 1–3 – сталі марок Т, 2 та графітізовані.

Fig. 1. Dependences of ultimate strength (a) and yield strength (b) and also relative elongation (c) on testing temperature: 1–3 – steels grades Т, 2 and graphitized steel.

вищенням температури до 800°C вже переважає її на 42%. Незначне збільшення відносного видовження для ГС починається при 700°C, до цього моменту вплив температури на цю характеристику відсутній. Загалом відносно видовження зросло у 4,5–7,8 рази для колісних сталей і лише у 1,3 рази – для ГС. Така зміна механічних властивостей обумовлена, в першу чергу, різним вмістом вуглецю в колісних сталях (0,58...0,65%), а також зміщенням діаграми стану залізвуглецевих сплавів вгору та вліво для ГС (рис. 2), що визначає нижчу температуру аустенізації для високоміцної сталі марки Т та вищу для ГС порівняно зі середньоміцною. Стрімкіше зростання пластичності сталі марки Т, починаючи з температури 500°C, може спричинити її структурно-фазовий стан. Саме до температур відпуску 500...550°C у цій сталі, мікролегованій ванадієм, відбувається дисперсійне зміцнення, вплив якого за вищих температур зникає [10], що сприятиме її пластифікації.

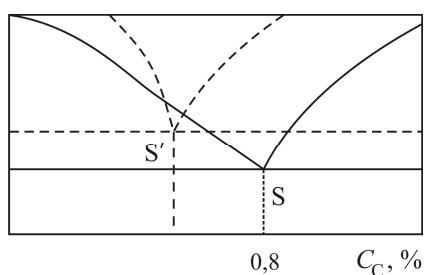


Рис. 2. Схематичне подання діаграми стану сплавів Fe–C:  
суцільні лінії – вуглецеві сталі;  
штрихові – графітізовані.

Fig. 2. Scheme of the Fe–C alloys state:  
solid lines – carbon steels;  
dashed – graphitized.

Отримані температурні залежності механічних характеристик свідчать, що за екстрених гальмувань, коли в зоні контакту суттєво підвищується температура (до 920°C [11]) матеріалу, сталі коліс типу КП-Т та КП-2 [7] забезпечують сприятливі умови для утворення дефектів типу повзун на поверхні кочення, ніж графітізовані.

**Низькотемпературна циклічна тріщиностійкість.** Роботоздатність залізничних коліс, які експлуатують в умовах низьких кліматичних температур, визначається схильністю сталей до низькотемпературного окрихчення [12]. Існують три основні типи зміщення низькотемпературних діаграм швидкостей росту втомної макротріщини, за якими оцінюють цю схильність конструкційних матеріалів та їх зварних з'єднань [13]. Для холодостійких матеріалів властивий тип I зміщення діаграми, коли в усьому діапазоні зміни  $\Delta K$  (від  $\Delta K_{th}$  до  $\Delta K_{fc}$ ) швидкість росту втомної макротріщини, коли задана низька температура, завжди менша порівняно з нормальною, що й виявили для ГС (рис. 3c). Для колісних сталей встановлено властивий вуглецевим сталям [13] тип II зміщення діаграми, коли за низьких розмахів  $\Delta K$  низькотемпературна циклічна тріщиностійкість вища, ніж за нормальної температури, але за високих розмахів  $\Delta K$ , навпаки, суттєво падає (рис. 3a, b). Отже, за низьких кліматичних температур ГС не чутлива до низькотемпературного окрихчення, на відміну від відомих колісних сталей, де з пониженням температури погіршується їх циклічна в'язкість руйнування  $\Delta K_{fc}$  (рис. 3).

Мікрофрактографічний аналіз виявив, що в усіх сталях за низьких і середніх розмахів  $\Delta K$  механізм низькотемпературного втомного руйнування достатньо енергоємний, у зламі переважають деформаційні гребені внаслідок в'язкого руйнування окремих мікрооб'ємів сталей (рис. 4a–c). При цьому для високоміцної сталі зафіксовано збільшення кількості череззеренних відкольних фасеток (рис. 4a) проти середньоміцної (рис. 4b) та графітізованої (рис. 4c). За високих розмахів  $\Delta K$  відкольні фасетки домінують у низькотемпературних зламах усіх сталей (рис. 4d–f). Характер їх руйнування практично однаковий, а отриманий рівень

циклічної в'язкості руйнування  $\Delta K_{fc}$  забезпечує локальна мікропластичність, яка проявляється в зламі деформаційними гребенями, що оточують окремі фасетки череззеренного відколу.

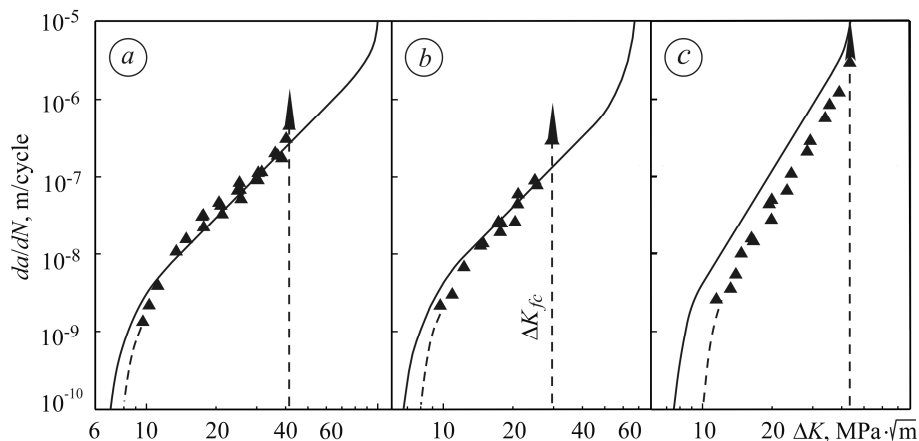


Рис. 3. Діаграми швидкостей росту втомної макротріщини у сталях марок 2 (a), Т (b) та ГС (c) за температури випробування 20°C (суцільна крива) та -40°C (▲).

Fig. 3. Fatigue crack growth rates in grade 2 (a), grade T (b) and graphitized (c) steels at temperatures 20°C (solid line) and -40°C (▲).

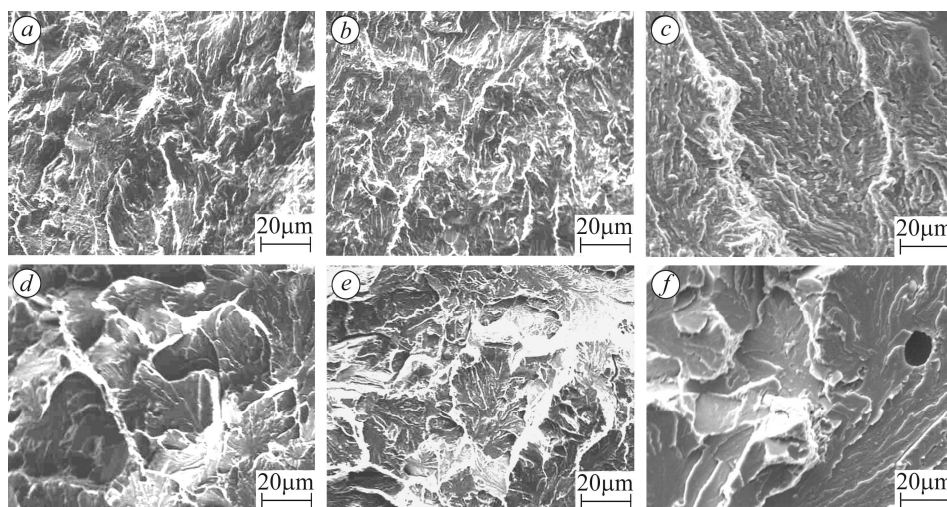


Рис. 4. Мікрофрактограми зразків сталей марок 2 (a, d), Т (b, e) та ГС (c, f) за температури -40°C при  $da/dN \approx 10^{-8}$  (a-c) та  $\approx 2 \cdot 10^{-7}$  m/cycle (d-f).

Fig. 4. Microfractographs of specimens of grade 2 (a, d), grade T (b, e) and graphitized (c, f) steels at temperature of -40°C at  $da/dN \approx 10^{-8}$  (a-c) and  $\approx 2 \cdot 10^{-7}$  m/cycle (d-f).

**Корозійно-циклічна тріщиностійкість.** Тріщиноутворення на поверхні кочення коліс, яке призводить до появи дефектів типу вищербина, в експлуатаційних умовах може залежати від корозійного впливу довкілля [14]. Це проявляється у підвищенні швидкості росту втомної тріщини на середньоамплітудній ділянці діаграми ( $da/dN-\Delta K$ ) залізвуглецевих сплавів [8]. Для обох досліджених колісних сталей негативний вплив корозивного середовища на кінетику втомної тріщини незначний (зокрема, порогове значення  $\Delta K_{th}$  і циклічна в'язкість руйнування  $\Delta K_{fc}$  змінюються мало), а для ГС взагалі відсутній (рис. 5). Для сталей ма-

рок 2 і Т він проявляється на початку середньоамплітудної ділянки діаграми (рис. 5а, б): при  $\Delta K = 12 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  – для середньоміцної сталі і  $\Delta K = 10 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  – для високоміцної. За таких значень  $\Delta K$  тут швидкість росту втомної тріщини  $V_{12}$  зростає у 2,9 рази, а  $V_{10}$  – у 2,4 рази, у той час як на решті середньоамплітудної ділянки це пришвидшення зростає в 1,7 і 1,4 рази відповідно.

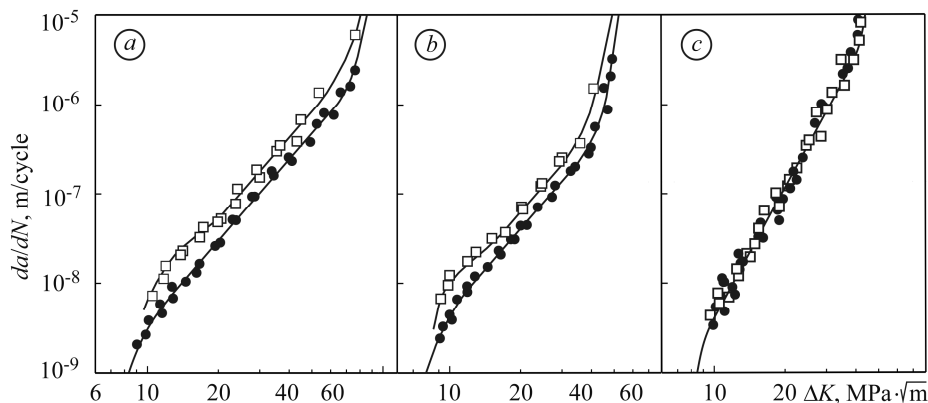


Рис. 5. Діаграми швидкостей росту втомної макротріщини сталей марок 2 (а), Т (б) та ГС (с) за випробувань у повітрі (●) та корозивному середовищі (□).

Fig. 5. Fatigue crack growth rates in grade 2 (a), grade T (b) and graphitized (c) steels in air (●) and in corrosion environment (□).

Мікрофрактографічний аналіз засвідчив, що мікромеханізми росту втомної тріщини у корозивному середовищі для усіх сталей (рис. 6) мало відрізняються від спостережуваних у повітрі.

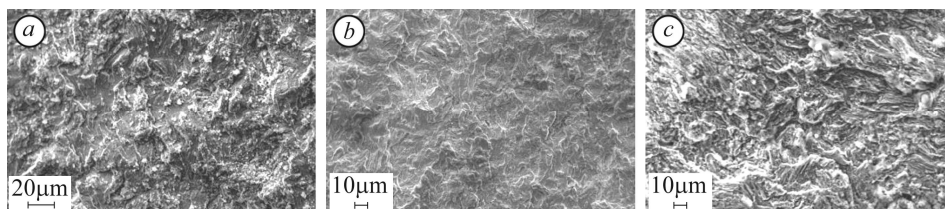


Рис. 6. Мікрофрактограми зразків сталей марок 2 (а), Т (б) та ГС (с) після корозійно-втомного випробування за низьких амплітуд навантаження.

Fig. 6. Microfractographs of specimens of grade 2 (a), grade T (b) and graphitized (c) steels after corrosive-fatigue tests under low-amplitude loading.

Для середньоміцної сталі марки 2 відкольні фасетки проявляються чіткіше, а слідів корозії більше (рис. 6а) порівняно з відповідними зламами сталі марки Т (рис. 6б), що підтверджує дещо сильніший вплив корозивного середовища на циклічну тріщиностійкість середньоміцної сталі. В зламах ГС вони взагалі відсутні (рис. 6с).

## ВИСНОВКИ

Виявлено, що за умов екстрених гальмувань, коли в зоні контакту суттєво підвищується температура матеріалу, для сталей залізничних коліс типу КП-Т та КП-2 створюються сприятливі умови для утворення дефектів типу повзун на поверхні кочення, ніж для графітизованої. Встановлено, що на відміну від традиційних колісних сталей, за низьких кліматичних температур (до  $-40^{\circ}\text{C}$ ) графіти-

зована сталь не схильна до низькотемпературного окрихчення, а вплив корозивного середовища на характеристики її циклічної тріщиностійкості відсутній. Отже, вона є перспективним матеріалом для залізничних коліс.

*РЕЗЮМЕ.* Сравнены закономерности влияния высоких (до 800°C) и низких (до -40°C) температур, а также коррозионной среды на механические свойства графитизированной стали и известных колесных сталей марок 2 и Т. Установлено, что снижение температуры аустенитизации и стремительный рост высокотемпературной пластичности сталей обеспечивают более благоприятные условия для образования дефектов типа ползун на поверхности катания железнодорожных колес. Выявлено, что графитизированная сталь при низких температурах (до -40°C) не склонна к низкотемпературной хрупкости, а коррозионная среда не влияет на ее циклическую трещиностойкость.

*SUMMARY.* Regularities of the influence of high (to 800°C) and low (to -40°C) temperatures, and also of corrosive environment on mechanical characteristics of graphitized steel and known wheel steels of grades 2 and T are compared. It is shown that the lower austenitization temperature and more sweep increase of high-temperature plasticity, provides more favorable condition of "slide-block" defects formation on the rolling surface of railway wheels. It is found that at low temperatures (down to -40°C) the graphitized steel is not liable to the low-temperature embrittlement, and there is no effect of the corrosion environment on its fatigue crack growth resistance characteristics.

1. *Лашко А. Д., Савчук О. М.* К вопросу о стратегии Укрзалізничці по решению проблемы устранения сверхнормативных износов пары "колесо-рельс" // Залізничний транспорт України. – 1997. – № 2-3. – С. 2-4.
2. *Hondius H.* Exploiting synergies in the wheelset market // Railway Gazette International. – 2008. – **164**, № 10. – P. 822-824.
3. *Про концепцію вибору сталей для високоміцних залізничних коліс / О. П. Осташ, В. Г. Анофрієв, І. М. Андрейко та ін.* // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012. – **48**, № 6. – С. 7-13.  
(*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. – 2012. – **48**, № 6. – P. 697-703.)
4. *Вплив міді на циклічну тріщиностійкість і термотривкість графітізованих сталей / І. М. Андрейко, І. П. Волчок, О. П. Осташ та ін.* // Там же. – 2004. – **40**, № 3. – С. 109-112.  
(*Andreiko I. M., Volchok I. P., Ostash O. P., Akimov I. V., and Holovatyuk Yu. V.* Effect of copper on the cyclic crack resistance and heat resistance of graphitic steels // Materials Science. – 2004. – **40**, № 3. – P. 416-420.)
5. *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* // Фунд. и прикл. проблемы черной металлургии. – 2004. – Вып. 7. – С. 231-243.
6. *Втомна довговічність сталей залізничних коліс / О. П. Осташ, І. М. Андрейко, В. В. Кулик та ін.* // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007. – **43**, № 3. – С. 93-102.  
(*Ostash O. P., Andreiko I. M., Kulyk V. V., Uzlov I. H., and Babachenko O. I.* Fatigue durability of steels of railroad wheels // Materials Science. – 2007. – **43**, № 3. – P. 403-414.)
7. *ГОСТ 10791-2011.* Колеса цельнокатаные. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2011. – 28 с.
8. *Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пос. в 4-х т. / Под общ. ред. В. В. Панасюка. Т. 4: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О. Н. Романив, С. Я. Ярема, Г. Н. Никифорчин и др.* – К.: Наук. думка, 1990. – 680 с.

9. *Андрейко І. М., Кулик В. В.* Температурна залежність механічних характеристик колісних сталей // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – **47**, № 1. – С. 113–115.  
(*Andreiko I. M. and Kulyk V. V.* Temperature dependence of mechanical characteristics of wheel steels // *Materials Science*. – 2011. – **47**, № 1. – P. 124–126.)
10. *Клиш А. В.* Розробка та освоєння технологічних параметрів зміцнюючої обробки високоносостійких залізничних коліс: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Дніпропетровськ, 2008. – 20 с.
11. *Frictional heat-introduced phase transformation on train wheel surface* / Su Hang, Pat Tao, Li Li et al. // *J. of Iron and Steel Research Int.* – 2008. – **15** (5). – P. 49–56.
12. *Низькотемпературна циклічна тріщиностійкість сталей залізничних коліс* / О. П. Остап, І. М. Андрейко, В. В. Кулик та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – **44**, № 4. – С. 52–57.  
(*Ostash O. P., Andreiko I. M., Kulyk V. V., Uzlov I. H., Uzlov K. I., and Babachenko O. I.* Low-temperature cyclic crack resistance of steels of railroad wheels // *Materials Science*. – 2008. – **44**, № 4. – P. 524–529.)
13. *Остап О. П., Жмур-Клименко В. Т.* Рост усталостных трещин в металлах при низких температурах (Обзор) // Там же . – 1987. – **23**, № 2. – С. 17–29.  
(*Ostash O. P. and Zhmur-Klimenko V. T.* Fatigue crack growth in metals at low temperatures (a review) // *Materials Science*. – 1987. – **23**, № 2. – P. 124–135.)
14. *Андрейко І. М., Кулик В. В., Остап О. П.* Опір корозійно-втомному руйнуванню сталей залізничних коліс // Там же. – 2011. – **47**, № 5. – С. 35–39.  
(*Andreiko I. M., Kulyk V. V., and Ostash O. P.* Resistance of steels of railroad wheels to corrosion-fatigue fracture // *Materials Science*. – 2011. – **47**, № 5. – P. 608–612.)

*Одержано 20.02.2015*