

УДК 539.43:620.193:669.018.294

## ОПІР КОРОЗІЙНО-ВТОМНОМУ РУЙНУВАННЮ СТАЛЕЙ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС

*І. М. АНДРЕЙКО, В. В. КУЛИК, О. П. ОСТАШ*

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

Досліджено характеристики циклічної тріщиностійкості (ЦТ) середньо- і високоміцної колісних сталей та їх здатність формувати захисну плівку на свіжоутвореній поверхні у дистильованій воді та 3,5%-му водному розчині NaCl. Виявлено, що негативний вплив цих корозивних середовищ на ЦТ обох сталей незначний і найбільше проявляється на початку середньоамплітудної ділянки діаграм ЦТ (швидкостей росту втомної тріщини), помітніше – для середньоміцної сталі.

**Ключові слова:** сталі залізничних коліс, корозія, корозійно-циклічна тріщиностійкість, мікрофрактографія.

Виготовлення залізничних коліс не передбачає будь-якого протикорозійного захисту, тому вони можуть кородувати під впливом атмосферного середовища. Це стосується нових і тривало експлуатованих коліс. Показано [1], що швидкість корозії, яку характеризує показник  $K$ , для колісної сталі (0,61% C) в ободі нового колеса становить 0,3...0,32  $g/(m^2 \cdot h)$ . Для сталі з пониженим вмістом вуглецю (0,46%), але додатково мікролегованої 0,1% V за підвищеного вмісту марганцю (до 1,0%) і кремнію (до 0,47%) показник  $K$  зростає до 0,33...0,4  $g/(m^2 \cdot h)$ . Для експлуатованих коліс зі зниженням вмісту вуглецю в сталі з 0,65 до 0,59% швидкість корозії на поверхні кочення зростає ( $K = 0,36$  і  $0,41$   $g/(m^2 \cdot h)$  відповідно), а в серединній частині ободу, навпаки, зменшується ( $K = 0,29$  і  $0,22$   $g/(m^2 \cdot h)$ ) [1]. Отримані результати неоднозначні, лише спостерігається тенденція до зниження швидкості корозії сталі на поверхні кочення нових і експлуатованих коліс з підвищенням у ній вмісту вуглецю [1].

Тріщини на поверхні кочення коліс, які виникають під дією експлуатаційних циклічних навантажень у зоні контакту колесо-рейка, можуть понижувати їх ресурс, особливо за присутності корозивного середовища. Встановлено [2], що для сталі 65Г швидкість росту втомної тріщини за низьких амплітуд навантаження у дистильованій воді зростає порівняно з випробуваннями на повітрі. Проте результати детальних досліджень про корозію та корозійно-механічне руйнування колісних сталей у літературі практично відсутні.

Мета роботи – вивчити опір корозії і характеристики циклічної тріщиностійкості (ЦТ) колісних сталей в умовах впливу корозивного середовища залежно від їх міцності.

**Матеріал і методика експериментів.** Випробовували зразки сталей, вирізані з високоміцного дослідно-промислового колеса типу КП-Т, а також середньоміцного колеса поточного виробництва типу КП-2, хімічний склад і механічні характеристики яких після випробувань за статичного і циклічного навантажень на повітрі подано раніше [3].

Корозійні властивості сталей характеризували швидкістю релаксації  $V_r$  потенціалу свіжоутвореної поверхні у початковий момент регенерації захисної плів-

ки після її абразивного руйнування на поверхні обертового зразка керамічним ножем, фіксуючи електрохімічні параметри пари метал–середовище [4]. Враховуючи вплив інтервалу часу ( $\Delta t$ ) вимірювання зміни електродного потенціалу на кореляційні залежності значень  $V_r$  і характеристик ЦТ матеріалів [5, 6], вибрали  $\Delta t = 10; 100$  і  $250$  ms.

Корозійно-циклічну тріщиностійкість визначали на компактних зразках з крайовою тріщиною (базовий розмір  $W = 40$  mm, товщина  $t = 11$  mm) за частоти  $10$  Hz і коефіцієнта асиметрії  $R = 0,05$  циклу навантаження у дистильованій воді і в 3,5%-му водному розчині NaCl при  $20^\circ\text{C}$ . Довжину втомної тріщини міряли катетометром КМ-6 з 25-кратним збільшенням. Діаграми ЦТ – залежності швидкості росту втомної тріщини  $da/dN$  від розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень  $\Delta K$  будували за відомою методикою [7]. Характеристиками ЦТ матеріалів вибрали величини  $\Delta K_{10^{-9}}$  в низько- та  $\Delta K_{10^{-5}}$  у високоамплітудній ділянках діаграми – розмаху  $\Delta K$  за швидкості росту тріщини  $10^{-9}$  та  $10^{-5}$  m/cycle відповідно, а також величину  $V_{\Delta K}$  – значення  $da/dN$  за заданого розмаху  $\Delta K$ , що характеризує середньоамплітудну ділянку діаграми [7].

Для мікрофрактографічного аналізу зразків використовували сканувальний електронний мікроскоп Carl Zeiss EVO 40XVP.

**Результати випроб та їх обговорення.** Вплив дослідних середовищ на корозійну поведінку колісних сталей має певні особливості. Полірована поверхня сталі середньоміцного колеса у 3,5%-му водному розчині NaCl покривалась локальними корозійними дефектами (пітингами). Вони накопичувались тільки в околі берегів тріщини, тобто пов'язані з ділянками пластично деформованої поверхні зразка, оскільки решта поверхні, що також знаходилась у корозивному розчині, залишалася тривалий час без корозійних ушкоджень. Полірована поверхня сталі високоміцного колеса поблизу тріщини покривалася суцільними корозійними плямами. Поверхні зразків обох сталей у дистильованій воді досить довго залишалися без видимих слідів корозії, у тому числі в околі берегів втомної тріщини.

Здатність колісних сталей формувати на своїй поверхні захисні плівки у різних корозивних середовищах після пошкодження поверхневого шару металу, наприклад, внаслідок циклічно повторюваної контактної взаємодії, спричиненої коченням чи проковзуванням колеса рейкою, визначає їх опірність до впливу середовища. Знаючи швидкість утворення захисної плівки, можна ранжувати колісні сталі за цією властивістю. Значення швидкостей  $V_r^{10}$ ,  $V_r^{100}$  і  $V_r^{250}$  за різних проміжків часу вимірювання ( $\Delta t = 10; 100$  і  $250$  ms) свідчать (див таблицю), що сталь високоміцного колеса володіє вищою захисною здатністю в початковий момент взаємодії пари метал–середовище ( $V_r^{10}$ ) в обох середовищах. Зі збільшенням часу вимірювання до  $100 \dots 250$  ms параметр  $V_r$  менш інформативний, відмінності у його значеннях несуттєві і неоднозначні: в розчині NaCl кращі захисні властивості плівки має високоміцна сталь, а в дистильованій воді – середньоміцна. Таким чином, підтверджуються отримані раніше [5, 6] дані, що інформативність параметра  $V_r$  тим вища, що менший інтервал часу  $\Delta t$  його вимірювання.

Вплив корозивного середовища на ЦТ залізовуглецевих сплавів проявляється, переважно, у підвищенні швидкості росту втомної тріщини на середньоамплітудній ділянці діаграми ( $da/dN-\Delta K$ ) [7]. Для обох сталей негативний вплив корозивного середовища на кінетику втомної тріщини незначний (зокрема, порогове значення  $\Delta K_{10^{-9}}$  і циклічна в'язкість руйнування  $\Delta K_{10^{-5}}$  змінюються мало) і найбільше проявляється на початку середньоамплітудної ділянки діаграми (рис. 1): при  $\Delta K = 12 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$  – для середньоміцної сталі і  $\Delta K = 10 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$  – для високо-

мічної. За таких значень  $\Delta K$  під дією корозивного середовища 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 складає 1,7 і 1,4 рази відповідно.

**Зміна швидкості формування захисної плівки на свіжоутвореній поверхні зразків колісних сталей**

Сталь <sup>*)</sup>	Середовище	$V_r^{10}$	$V_r^{100}$	$V_r^{250}$
		V/s		
ВК	Дистильована вода	2,30	0,72	0,43
СК		1,15	0,85	0,64
ВК	3,5% р-н NaCl	1,75	0,79	0,62
СК		1,20	0,60	0,40

<sup>\*)</sup> Сталь високоміцного (ВК) і середньоміцного (СК) коліс.

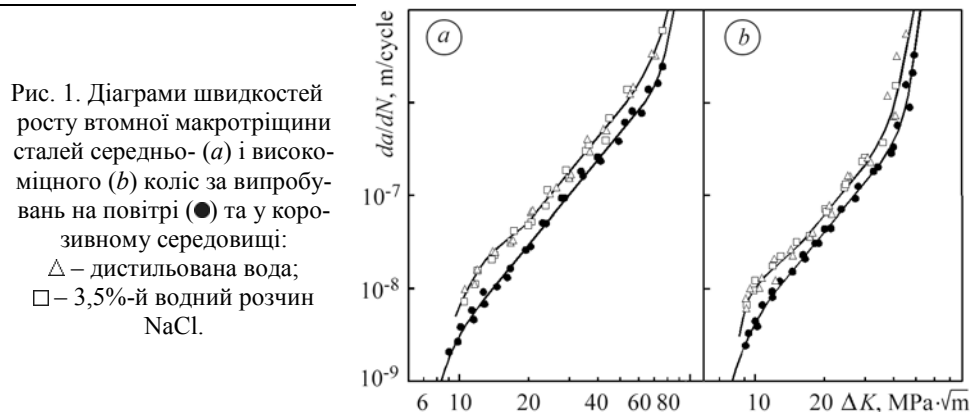


Fig. 1. Fatigue crack growth rates of the medium- (a) and high-strength (b) wheel steels in air (●) and in corrosion environment:  $\Delta$  – distilled water;  $\square$  – 3.5% NaCl water solution.

Виділимо три особливості отриманих результатів: по-перше, вплив дистильованої води і 3,5%-го водного розчину NaCl практично однаковий; по-друге, область підвищеного негативного впливу корозивного середовища при  $da/dN = 5 \cdot 10^{-9} \dots 3 \cdot 10^{-8}$  m/cycle, яка помітніша для середньоміцної сталі (рис. 1a) порівняно з високоміцною (рис. 1b), надає діаграмі швидкостей корозійно-втомних тріщин цих сталей специфічної форми на середньоамплітудній ділянці, характерної для сталей, схильних до корозійного розтріскування [7], що свідчить про водневий механізм окрихчення [8]; по-третє, більша швидкість утворення захисної плівки  $V_r^{10}$  високоміцної сталі (див. таблицю) зумовлює дещо менший ефект зниження її ЦТ (рис. 1b) проти середньоміцної (рис. 1a).

Мікрофрактографічний аналіз зламів зразків колісних сталей виявив, що за низьких і високих амплітуд навантаження мікромеханізми росту втомної тріщини для обох сталей (рис. 2) у досліджених корозивних середовищах незначно відрізняються від спостережуваних на повітрі [9]: тільки дещо інтенсифіковані процеси череззеренного відколу за відсутності міжзеренного, характерного для руйнування сталей у корозивних середовищах за впливу водневого окрихчення. При цьому для середньоміцної сталі відкольні фасетки проявляються чіткіше (рис. 2a), а слідів корозії більше (рис. 2b) порівняно з відповідними зламами високоміцної сталі (рис. 2d, e), що відповідає дещо сильнішому впливу корозивного середови-

ща її ЦТ, ніж високомічної на початку середньоамплітудної ділянки діаграми швидкостей росту втомної тріщини (рис. 1а і b, відповідно).

За високих амплітуд навантаження відкольний череззернений механізм руйнування посилюється (рис. 2с, f). Це яскравіше проявляється для високомічної сталі (рис. 2f), що пов'язано з її низькою циклічною в'язкістю руйнування. Проте в обох випадках розвинені мікрообласті ямкового (пластичного) характеру (рис. 2с, f) зумовлюють достатню циклічну в'язкість руйнування цих сталей: більшу для середньоамплітудної (рис. 2с і 1а), меншу – для високомічної (рис. 2f і 1b).

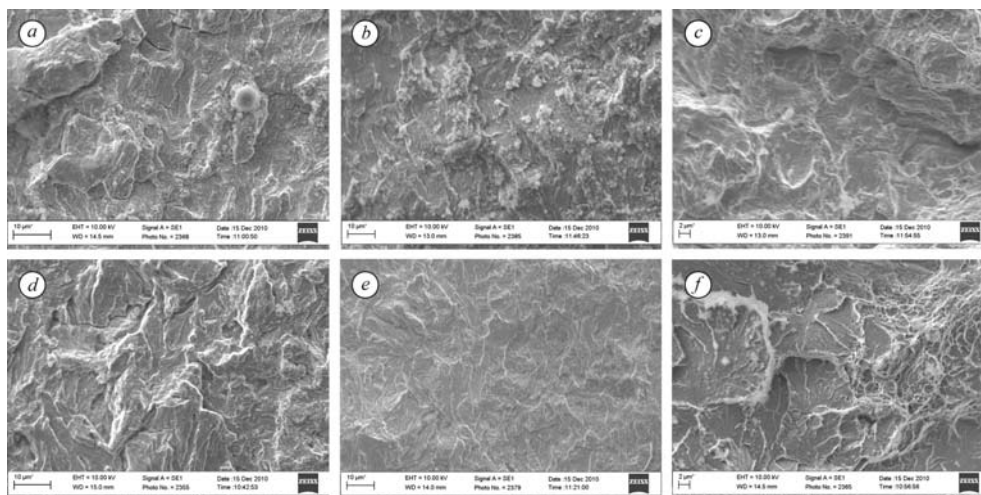


Рис. 2. Мікрофрактограми зразків середньо- (а–с) і високомічної (d–f) колісних сталей після випробувань у дистильованій воді (а, d, f) і в 3,5-му розчині NaCl (b, c, e) за низьких (а, b, d, e) і високих (с, f) амплітуд навантаження.

Fig. 2. Microfractograph of medium- (a–c) and high-strength (d–f) wheel steel specimens after investigation in distilled water (a, d, f) and in 3.5% NaCl solution (b, c, e) for low (a, b, d, e) and high (c, f) load amplitudes.

## ВИСНОВОК

Корозивне середовище несуттєво знижує циклічну тріщиностійкість сталей середньо- (типу КП-2) і високомічних (типу КП-Т) залізничних коліс. За опором корозії та корозійно-втомному руйнуванню високомічна колісна сталь не поступається середньоамплітудній.

**РЕЗЮМЕ.** Исследованы характеристики циклической трещиностойкости (ЦТ) средне- и высокопрочной колесных сталей и их способность формировать защитную пленку на свежесформированной поверхности в дистиллированной воде и 3,5%-м водном растворе NaCl. Показано, что отрицательное влияние этих коррозионных сред на ЦТ обеих сталей незначительное и в большей мере проявляется в начале среднеамплитудного участка диаграммы ЦТ (скоростей роста усталостной трещины), более заметно – для среднепрочной стали.

**SUMMARY.** The characteristics of fatigue crack growth resistance of medium- and high-strength railway wheel steels and their ability to form a protective film on a new-formed surface in the distilled water and 3.5% NaCl water solution are investigated. It is shown that the negative influence of corrosion environments on fatigue crack growth resistance of both steels is insignificant and is demonstrated most of all at the beginning of Paris region of fatigue crack growth rates diagrams, more noticeable for medium-strength steel.

1. Губенко С. И., Пинчук С. И., Белая Е. В. Особенности коррозии колесных сталей с разной микроструктурой // Теория и практика металлургии. – 2009. – № 1–2. – С. 111–117.

2. Полутранко И. Б., Ярема С. Я., Дурягин В. А. Влияние воды и ее ингибирования на кинетику усталостных трещин в сплаве В95 и стали 65Г // Физ.-хим. механика материалов. – 1981. – № 2. – С. 10–15.  
(*Polutranko I. B., Yarema S. Ya., and Duryagin V. A. The influence of water and its inhibiting on the kinetics of fatigue cracks in V95 alloy and 65G steel // Soviet Materials Science. – 1981. – № 2. – P. 114–118.*)
3. Втомна довговічність сталей залізничних коліс / О. П. Остащ, І. М. Андрейко, В. В. Кулик та ін. // Там же. – 2007. – № 3. – С. 93–102.  
(*Ostash O. P., Andreiko I. M., Kulyk V.V., et al. Fatigue durability of steels of railroad wheels // Materials Science. – 2007. – № 3. – P. 403–414.*)
4. Патент України № 83614. Спосіб визначення ступеня деградації теплостійких сталей / О. П. Остащ, О. В. Вольдемаров, В. М. Учанин, А. Д. Івасишин. – Опубл. 25.07.2008; Бюл. № 14.
5. Вплив корозивного середовища на втомну довговічність деградованих алюмінієвих сплавів типу Д16 і В95 / О. П. Остащ, І. М. Андрейко, Ю. В. Головатюк, О. І. Семенець // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – № 5. – С. 75–84.  
(*Ostash O. P., Andreiko I. M., Holovatyuk Yu. V., and Semenets' O. I. Effect of corrosive media on the fatigue life of degraded D16- and V95-type aluminum alloys // Materials Science. – 2008. – № 5. – P. 672–682.*)
6. Оцінювання деградації сталей парогонів за їх структурними, механічними та електрохімічними характеристиками / О. П. Остащ, О. В. Вольдемаров, П. В. Гладич, А. Д. Івасишин // Там же. – 2010. – № 4. – С. 5–12.  
(*Ostash O. P., Vol'demarov O. V., Hladysh P. V., and Ivasyshyn A. D. Evaluation of the degradation of steels of steam pipelines according to their structural, mechanical, and electrochemical characteristics // Materials Science. – 2010. – № 4. – P. 431–439.*)
7. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пос. в 4-х т. / Под общ. ред. В. В. Панасюка. – К.: Наук. думка, 1988–1990. – Т. 4: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О. Н. Романив, С. Я. Ярема, Г. Н. Никифорчин и др. – 1990. – 680 с.
8. Низькотемпературна циклічна тріщиностійкість наводнених зварних швів / О. П. Остащ, О. Д. Зинюк, І. К. Походня, Б. В. Юрлов // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1995. – № 2. – С. 62–68.  
(*Ostash O. P., Zyniuk O. D., Pokhodnya I. K., and Yurlov B. V. Low-temperature cyclic crack-growth resistance of hydrogenated welds // Materials Science. – 1995. – № 2. – P. 213–218.*)
9. Вплив режиму термічної обробки і асиметрії циклу навантаження на циклічну тріщиностійкість колісних сталей / О. П. Остащ, І. М. Андрейко, В. В. Кулик та ін. // Там же. – 2009. – № 2. – С. 63–70.  
(*Ostash O. P., Andreiko I. M., Kulyk V. V., et al. Influence of the mode of thermal treatment and load ratio on the cyclic crack-growth resistance of wheel steels // Materials Science. – 2009. – № 2. – P. 211–219.*)

Одержано 05.10.2011