

УДК 621.771.294:620.17

СТРУКТУРА ТА ОПІР РУЙНУВАННЮ СТАЛЕЙ У РІЗНИХ ЗОНАХ ЗАЛІЗНИЧНИХ ОСЕЙ

О. І. БАБАЧЕНКО¹, Г. А. КОНОНЕНКО¹, Р. В. ПОДОЛЬСЬКИЙ¹,
О. А. САФРОНОВА¹, А. О. ТАРАНЕНКО²

¹ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, Дніпро;

² ДП Науково-дослідний і конструкторсько-технологічний інститут трубної промисловості ім. Я. Ю. Осади, Дніпро

Досліджено втомну довговічність та мікроструктуру залізничних осей з особливостями макроструктури, виявленими за допомогою ультразвукового контролю (вісь № 178), та без таких особливостей (вісь № 143) марки EA1N, виготовлених за стандартом EN 13261:2020. Порівняльно оцінено відповідні зразки, відібрані поблизу поверхні, на відстані 1/2 радіуса та у центрі осей. Встановлено, що втомна довговічність металу поверхневого шару вища, ніж на глибині та у центральній частині. При цьому перепад значень за перерізом осі з дефектами склав до 10%, у той час як для осі без дефектів втомна довговічність металу поблизу поверхні майже в п'ять разів більша, ніж зразків, вирізаних з центра. За результатами мікроструктурного та фрактографічного аналізів встановлено пряму залежність виникнення втомних тріщин від розміру та кількості неметалевих включень, мікропор у сталі та структурної неоднорідності.

Ключові слова: залізнична вісь, втомна довговічність, мікроструктура, мікропора, фрактографія.

The fatigue life and microstructure of railway axles with macrostructural features detected by ultrasonic testing (axle № 178) and without such features (axle № 143) of EA1N grade, manufactured according to standard EN 13261:2020, have been studied. A comparative analysis of the relevant samples taken near the surface, at a distance of 1/2 radius and in the center of the studied railway axles has been done. It is shown that the metal of the surface layer of the studied axles has higher values of fatigue life compared to the metal at a depth of 1/2 of the axles radius, and in its central part. The difference in the values of the cross-section of the axles with defects is up to 10%, while for the axle without defects the value of fatigue life of the metal near the surface is almost 5 times greater than the samples cut out from the center. Based on the results of microstructural and fractographic analyses, the direct dependence of fatigue cracks on the size and number of non-metallic inclusions, micropores in steel and structural inhomogeneity has been established.

Keywords: railway axle, fatigue life, microstructure, micropore, fractography.

Вступ. Залізнична вісь – високонавантажена деталь рухомого складу. Різноманітні навантаження, що діють на неї за обертання під час експлуатації, викликають знакозмінні напруження з різними амплітудами. Тому до матеріалів залізничного призначення та способів їх оброблення ставлять достатньо строгі вимоги [1]. Велике значення мають заходи для підвищення границі витривалості та втомної довговічності сталі в поверхневих шарах для різних умов експлуатації [2–4].

Ресурс осі залежить від багатьох показників, які визначають її службові характеристики. Зокрема, від хімічного складу та технології виробництва сталі, міцності, пластичних і в'язких властивостей, напруженого стану тощо [5]. Одним

Контактна особа: О. А. САФРОНОВА, e-mail: safronovaaa77@gmail.com

з найважливіших технічних показників роботоздатності є її опір втомному руйнуванню [6–8]. Спричиняти зародження та ріст втомних тріщин можуть удари, які сприймає колісна пара, запони, закоти, забоїни, структурна неоднорідність, яка пов'язана зі спадковістю литої структури, а також неметалеві включення [9–11]. Зароджуються і поширюються втомні тріщини за впливу макропластичної деформації. Характерно, що матеріал під дією повторно-змінних навантажень може руйнуватися за напружень, нижчих за границю плинності [12]. Відомо, що розповсюдження тріщин під час втомного руйнування забезпечують розтягальні напруження в об'ємі металу [13, 14]. Під циклічною довговічністю розуміють кількість циклів напружень (чи деформації), що витримує навантажуваний об'єкт, до граничного стану (утворення втомної тріщини визначеної довжини або повного руйнування) [15, 16]. За втомним зломом в багатьох випадках можна охарактеризувати якість досліджуваного металу.

Мета випробувань – визначити втомну довговічність зразків за напружень 260...262 МПа, вирізаних з різних частин осей.

Матеріал і методика. Випробовували зразки (1–12), вирізані з осей № 143 без дефекту та № 178 (з дефектом) марки EA1N (стандарт EN 13261:2020) однієї плавки (mass%: 0,35 C, 0,22 Si, 0,86 Mn, 0,009 P, 0,002 S, 0,09 Cr, 0,0245 Mo, 0,11 Ni, 0,02 Al, 0,15 Cu, 0,002 V), використовуючи ультразвуковий контроль.

На втомну міцність досліджували циліндричні зразки з робочою частиною $\varnothing 8 \text{ mm}$ (тип II за ГОСТ 25.502), застосовуючи машину типу УБМ за чистого згину з обертанням (коефіцієнт асиметрії $R = -1$) [17]. Максимальні напруження циклу становили 260...262 МПа. Зразки з маркуванням 1–4 вирізали максимально наближено до поверхні осі, 5–8 – на глибині $1/2$ радіуса осі, 9–12 – з центральної частини осей.

Для металографічних досліджень зразків використовували оптичні мікроскопи Neophot 30 і Axiovert 200M MAT після травлення 4%-им розчином азотної кислоти. Розміри і кількість пор розраховували за допомогою програмного модуля ImageJ. Фрактографічні дослідження поверхні втомного зламу виконували на растровому електронному мікроскопі РЕМ 106.

Результати та їх обговорення. Результати випробувань до руйнування зразків 1–12 за напружень 260...262 МПа, вирізаних з ділянок, максимально наближених до поверхні, внутрішнього ($1/2$ радіуса) та центральних шарів осі, подано на рис. 1.

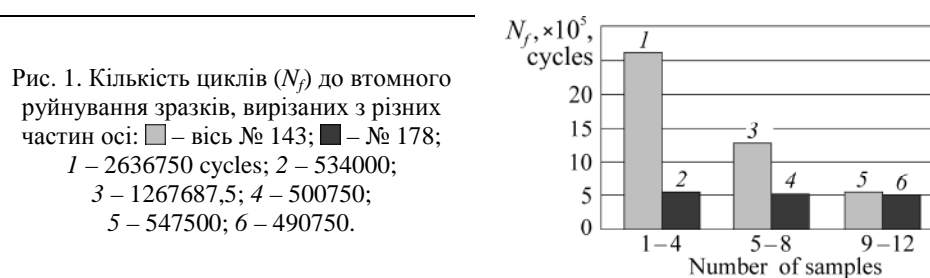


Рис. 1. Кількість циклів (N_f) до втомного руйнування зразків, вирізаних з різних частин осі: ■ – вісь № 143; ■ – № 178; 1 – 2636750 cycles; 2 – 534000; 3 – 1267687,5; 4 – 500750; 5 – 547500; 6 – 490750.

Fig. 1. Number of cycles (N_f) before fatigue failure of samples cut out from different parts of the axle: ■ – axle № 143; ■ – № 178; 1 – 2636750 cycles; 2 – 534000; 3 – 1267687.5; 4 – 500750; 5 – 547500; 6 – 490750.

Встановили, що втомна довговічність осі № 143 за усім перерізом вища, ніж осі № 178. Оскільки втомна тріщина під час циклічного навантаження зароджується біля концентраторів напружень (надрізи, тріщини, неметалеві включення, пори) або в місцях структурної неоднорідності скупчення дислокацій під дією напружень [18, 19], визначально на втомну довговічність впливає структурний стан сталі. Тому, щоб встановити чинники різної втомної довговічності, викону-

вали металографічні дослідження зразків (рис. 2 і 3). Причиною підвищеної на 91,4% втомної довговічності металу зразків, вирізаних з місця, максимально наближеного до поверхні (зразки 3), з осі № 143, порівняно з такими з осі № 178, є менший розмір та кількість мікропор у полі зору (розмір одиничних пор: 16,9 проти 21 μm ; кількість пор – 16 проти 52, відповідно) і комплексних оксидів (максимальний розмір включень: 11,1 проти 7,3 μm ; кількість включень – 6 проти 12, відповідно). Тому злам зразка з осі № 143 має глибший рельєф, що характеризує його як в'язкий злам, і менший розмір зони спонтанного руйнування (доламу) [20]. Мікроструктура обох зразків принципово не відрізняється (рис. 2*a, d*).

Втомна довговічність зразків з осі № 143, вирізаних на глибині 1/2 радіуса (зразки 8), на 73% більша, ніж з осі № 178. Встановили, що в металі осі № 143, порівняно з віссю № 178, в 2,4 рази менше мікропор (17 проти 41 у полі зору), а також удвічі менший розмір одиничних мікропор (19 проти 38 μm) і менша в 3,2 рази кількість рядкових (10 проти 32 у полі зору). Також зразок з осі № 143 має менше локальних ділянок з чіткими особливостями структури (структурною неоднорідністю), пов'язаними з ліквідаційними мікрооб'ємами, які формуються під час кристалізації сталі (рис. 2*b*). В зразку з осі № 178 присутня локальна структура відманштетту, яка могла виникнути тільки в результаті спадкового впливу структури, сформованої під час кристалізації безперервно литої заготовки (рис. 2*e*). Розміри зон контрольованого і спонтанного росту втомної тріщини (доламу) близькі для зразків обох осей.

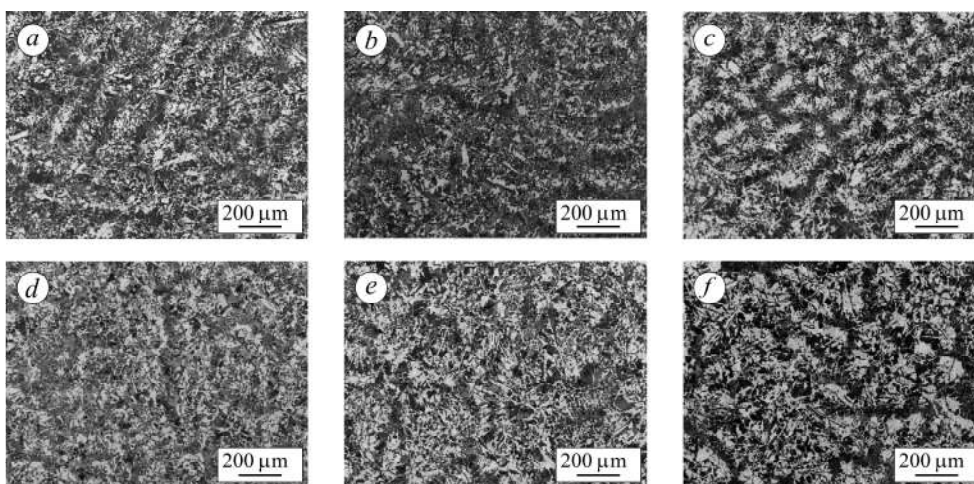


Рис. 2. Мікроструктура після втомних випробувань зразків осей № 143 (*a–c*) та № 178 (*d–f*): *a, d* – зразок 3; *b, e* – 8; *c, f* – 9.

Fig. 2. Microstructure after fatigue tests of samples of axles № 143 (*a–c*) and № 178 (*d–f*): *a, d* – sample 3; *b, e* – 8; *c, f* – 9.

Причинами вищої на 12,7% втомної довговічності зразка, вирізаного з центра осі № 143, проти зразків з осі № 178 є менші в 2,7 рази розмір та кількість мікропор (розмір одиничних пор: 14 проти 39 μm ; кількість пор: 9 проти 20 у полі зору), а також структура відманштетту у зразку з осі № 178 (рис. 2*f*). Розмір зон контрольованого і спонтанного росту втомної тріщини (доламу) близький для зразків обох осей.

Через стадійність втомного навантаження відсутня традиційна картина поверхні руйнування, як під час інших видів навантаження (статичних або динамічних). Замість зламів “зірочкою” або “чашкового” осередків виникнення втомної тріщини декілька, які знаходяться з протилежних сторін (рис. 3). Таке явище ха-

рактерне за малих номінальних напружень [21]. Злам волокнисто-лускатий (рис. 3). Тріщина в зразку 3 (рис. 3а) поблизу поверхні руйнування осі № 143 виникла після великої кількості циклів і відгалужувалась, а цей же зразок з осі № 178 руйнувався без такого відгалуження (рис. 3d). Зразки 8 (рис. 3b, e) мають характерну для втомного зламу зону змішаного мікрорельєфу, що складається з мікросмуг і “ямок”. На поверхні зламу зразка 9 з осі № 178 є частинки неметалевих включень або їх сліди у вигляді заглиблень (рис. 3f). За характером слідів фронту тріщини можна встановити осередки руйнування і їх будову. У зразках 9 (рис. 3c, f) обох партій є витягнуті параболічні ямки, але орієнтовані до з’єднаних поверхонь зламу в протилежних напрямках, що свідчить про зсувний характер руйнування. В інших зразках зафіксували рівновісні ямки, спричинені рівномірним об’ємним розтягуванням за нормального відриву (рис. 3) [13, 20, 21]. В зразку 9 з осі № 178 виявили ймовірні концентратори напружень у центральній її частині.

За результатами мікроструктурного та фрактографічного аналізів встановили, що неметалеві включення та пори відіграють важливу роль у поширенні тріщини, слугуючи концентраторами напружень, від яких зароджувалася і розвивалася втомна тріщина (рис. 3).

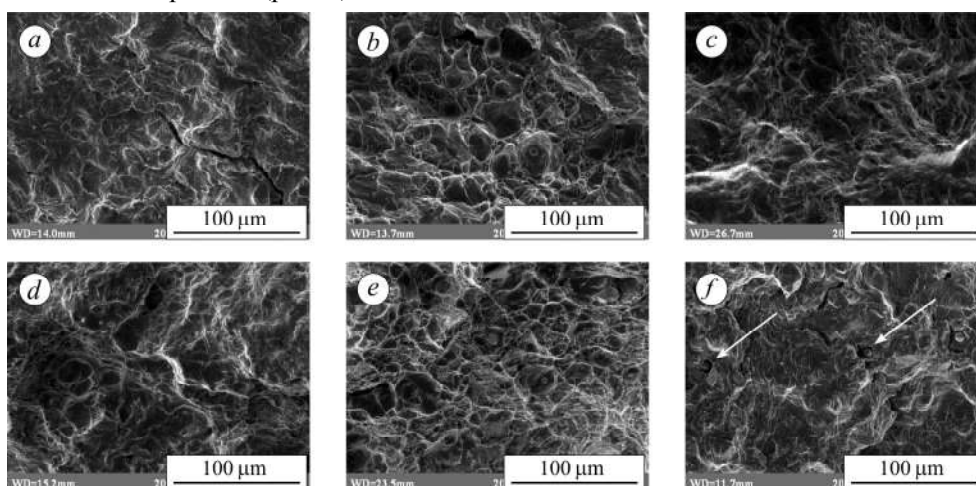


Рис. 3. Мікрофрактографія зламів після втомних випробувань зразків з осей № 143 (a–c) та № 178 (d–f): a, d – зразок 3; b, e – 8; c, f – 9.

Fig. 3. Microfractography after fatigue tests of axles № 143 (a–c) and № 178 (d–f) samples: a, d – sample 3; b, e – 8; c, f – 9.

“Ямки” на поверхні зламу зразка з осі № 178, вирізаного з місця, максимально наближеного до поверхні осі (зразок № 3), ймовірно, утворилися на неметалевих включеннях, що узгоджується з результатами їх досліджень на полірованих зразках.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що втомна довговічність зразків з осі № 143 за усім перерізом вища, ніж з осі № 178. За напружень 262...260 МПа втомна довговічність зразків з осі № 143, які максимально наближені до поверхні, на 79,8% вища, ніж з осі № 178; для зразків, вирізаних на глибині 1/2 радіуса з осі № 143, вона на 60,4% більша, ніж з осі № 178, а з центральної частини осі № 143 – на 10,3%, ніж з осі № 178. Причиною цього є менша кількість мікропор, розмір та кількість неметалевих включень, об’єм локальних ділянок з чіткими особливостями структури, пов’язаними з ліквідаційними мікрооб’ємами та впорядкованою відманштеттовою структурою, які формуються під час кристалізації безперервної литої заготовки. В осі № 143 такі локальні ділянки є лише в центральній частині та менш чіткі, в

той час як в осі № 178 ці особливості мікроструктури присутні не тільки в центральній частині, але і на глибині 1/2 радіуса. Під час фрактографічного аналізу зразків з осі № 178 виявлено частинки неметалевих включень або їх сліди у вигляді заглиблень на поверхні зламу, що є осередками зародження втомних тріщин, а отже, причиною низької втомної довговічності її металу.

1. Babachenko A. I. and Kononenko A. A. Influence of the chemical composition and structural state on tough properties of steel for railway wheels // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. – 2008. – 30 (Spec. Iss.). – P. 227–234.
2. Goo B.-C., Mun H.-S., and Cho I.-S. Very-high-cycle fatigue and charpy impact characteristics of manganese steel for railway axle at low temperatures // *Appl. Sci.* – 2020. – **10**. – P. 1–18.
3. Low-temperature cyclic crack resistance of steels of railroad wheels / O. P. Ostash, I. M. Andreiko, V. V. Kulyk, K. I. Uzlov, and O. I. Babachenko // *Materials Science*. – 2008. – **44**, № 4. – P. 524–529.
4. 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.
5. Fatigue resistance and remaining life assessment of induction-hardened S38C steel railway axles / Y. Hu, Q. Qin, S. Wu, X. Zhao, and W. Wang // *Int. J. of Fatigue*. – 2021. – **144**. – P. 1–10.
6. Investigation of fatigue crack growth in full-scale railway axles subjected to service load spectra: experiments and predictive models / A. Pourheidar, L. Patriarca, S. Beretta, and D. Regazzi // *Metals*. – 2021. – **11**. – P. 1–17.
7. Assessing surface fatigue crack growth in railway wheelset axle / D. V. Rudavskiy, Yu. I. Kaniuk, Z. A. Duriagina, V. V. Kulyk, M. S. Shefer, and I. Ya. Dolinska // *Archives of Mat. Sci. and Eng.* – 2020. – **106**, № 2. – P. 59–67.
8. Неуен Нгок Т., Капралов В. М., Коленко Г. С. Влияние частот нагружения на сопротивление усталости металлов // *Науч.-техн. ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. – 2019. – **25**, № 2. – С. 68–77.
9. Писаренко Г. С., Квитка О. Л., Уманський Е. С. Опір матеріалів. – К.: Вищ. шк., 1993. – 656 с.
10. Influence of the structural parameters of high-carbon steel on the impact strength / E. V. Parusov, S. I. Gubenko, A. B. Sychkov, I. N. Chuiko, L. V. Sagura, and A. I. Denisenko // *Steel in Translation*. – 2018. – **48**, № 12. – P. 812–817.
11. Inherent effect of the crystal structure of continuous cast steel billets on the formation of structure of high carbon wire rod in coils / A. B. Sychkov, E. V. Parusov, A. N. Zavalishin, and A. V. Kozlov // *J. of Chemical Technol. & Metallurgy*. – 2018. – **53**, № 5. – P. 977–985.
12. Шестопалова Л. П., Лихачева Т. Е. Методы исследования материалов и деталей машин при проведении автотехнической экспертизы: уч. пос. – М.: МАДИ, 2017. – 180 с.
13. Энгель Л., Клингеле Г. Растровая электронная микроскопия. Разрушение. – М.: Металлургия, 1986. – 232 с.
14. Influence of braking on the microstructure and mechanical behavior of railroad wheel steels / O. P. Ostash, I. M. Andreiko, V. V. Kulyk, and V. I. Vavruk // *Materials Science*. – 2013. – **48**, № 5. – P. 569–574.
15. Золоторевский В. С. Механические свойства металлов: учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
16. Гуляев А. П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1977. – 648 с.
17. ГОСТ 25.502. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на втому. – М: Москва, 1979. – 50 с.
18. Дослідження впливу швидкості охолодження при затвердінні безперервнолитої заготовки на особливості дендритної структури вуглецевої сталі / О. І. Бабаченко, К. Г. Дьоміна, Г. А. Кононенко, Ж. А. Дементьєва, О. А. Сафронова // *Фундаментальні та прикл. проблеми чорної металургії*. – 2020. – № 34. – С. 229–246.
19. Гордеева Т. А., Жегина И. П. Анализ изломов при оценке надежности материалов. – М.: Машиностроение, 1978. – 200 с.
20. Фрактография и атлас фрактограмм: справ. изд. / Под ред. Дж. Феллоуза; пер. с англ. – М.: Металлургия, 1982. – 490 с.
21. Электронная и оптическая фрактография. Методы, рекомендации. – М.: Всесоюз. ин-т легких сплавов, 1972. – 24 с.

Одержано 30.11.2021