

УДК 625.1.032.3

В. В. Косарчук

О. Ю. Рафальський

МЕТОДИ ОЦІНКИ ДОВГОВІЧНОСТІ ТА ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ РЕЙОК ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ

Розглянуто основні методи прогнозування довговічності й залишкового ресурсу рейок – експериментальні, експлуатаційні та теоретичні.

Рассмотрены основные методы прогнозирования долговечности и остаточного ресурса рельсов – экспериментальные, эксплуатационные и теоретические.

Basic methods to predict lifetime of the rails are considered.

Ключові слова: рейки, довговічність, пошкоджуваність, моделі деформування, метод кінцевих елементів.

З огляду на умови роботи рейок в залізничній колії якість рейкової сталі зазвичай оцінюють за даними механічних випробувань в умовах статичного, циклічного і динамічного навантаження. При цьому зразки для випробувань вирізають з готових рейок.

Діючим вітчизняним стандартом на залізничні рейки (ДСТУ 4344:2004) передбачено проводити лише випробування на статичний розтяг циліндричних зразків і ударну в'язкість призматичних зразків з одностороннім надрізом (тест Шарпі), що вирізані з готових рейок у напрямку прокатки. Крім того, стандарт передбачує визначення твердості поверхні кочення рейок за методом Брінеля, а також (не обов'язково) проведення копрових випробувань рейок.

Зауважимо, що чинним стандартом для виготовлення рейок передбачено використання майже 20 марок сталі, які відрізняються за характеристиками механічних властивостей. Більш високі вимоги до якості рейок висуває європейський стандарт EVS EN 13674-1.

Крім випробувань на статичний розтяг циліндричних зразків за стандартом EVS EN 10002-1 та визначення твердості поверхні кочення рейки за Брінелем (відповідно до міжнародного стандарту EN ISO 6506-1), даним стандартом передбачено визначення характеристик в'язкості руйнування на компактних зразках (за американським стандартом ASTM E399), визначення характеристик рейкової сталі при циклічному навантаженні (розтяг – стиск циліндричних зразків з коефіцієнтом асиметрії циклу $r = -1$ на базі випробувань $5 \cdot 10^6$ циклів відповідно до міжнародного стандарту ISO 1099),

© Косарчук В. В., Рафальський О. Ю., 2014

а також визначення швидкості росту тріщини у тестах на триточковий циклічний згин рейки з надрізом у головці (за британським стандартом BS 6835-1).

Вищезгадані стандарти встановлюють граничні значення для характеристик механічних властивостей рейкової сталі за вказаних випробувань, але стосуються вони лише нових рейок. Слід зауважити, що чинні стандарти не враховують деякі особливості структурної неоднорідності матеріалу рейки, які пов'язані з технологічним процесом її виготовлення. Внаслідок прокатки заготовок з великими ступенями витяжки матеріал рейки є неоднорідним, має чітко виражену деформаційну текстуру, яка спричиняє появу анізотропії всіх механічних властивостей, а також наявність неоднорідних полів залишкових напружень. Крім того, матеріал рейок вітчизняного виробництва часто забруднений неметалеви́ми або інтерметалідними частинками, які після прокатки створюють ланцюжки. Потім саме у зонах, де розміщені вказані ланцюжки, виникають внутрішні тріщини.

Вказані фактори значно впливають на еволюцію напружено-деформованого стану рейки в процесі експлуатаційних навантажень від коліс рухомого складу, на кінетику накопичення пошкоджень, появу дефектів і, врешті решт, на довговічність рейок.

Звісно, в процесі експлуатації матеріал рейки піддається впливу різноманітних факторів – силових, температурних, кліматичних, електромагнітних тощо. Як наслідок, змінюються й поточні механічні властивості рейкової сталі. Крім того, ще до закінчення нормативного терміну експлуатації рейки матимуть певну величину зносу та дефекти, в основному, контактно-втомного походження. Такі рейки надалі будемо називати дефектними.

Указані фактори у чинних стандартах не враховуються, тому відсутні і нормативні методики визначення залишкового ресурсу рейок.

Оцінка залишкового ресурсу для рейок, що експлуатуються або ж пройшли нормативний період експлуатації, може бути здійснена на основі експериментальних, експлуатаційних та теоретичних досліджень.

Експериментальні методи ґрунтуються на реалізації натурних випробувань моделей конструкції в умовах, які є максимально близькими до експлуатаційних.

Експлуатаційні дослідження передбачають спостереження з періодичним контролем в польових умовах за розвитком дефектів рейок в процесі експлуатації.

Теоретичні дослідження передбачають побудову математичних моделей деформування, накопичення пошкоджень і руйнування матеріалу, з якого виготовлена конструкція, та розрахунку кінетики напружено-деформованого стану конструкції або окремого її елемента, що відповідає за її несучу здатність, в процесі експлуатації.

Стисло розглянемо переваги й недоліки вказаних методів.

Донедавна експериментальні методи оцінки міцності і довговічності на натурних зразках були основним джерелом інформації про конструктивну міцність деталей машин і елементів конструкцій. Основними недоліками таких методів є дуже висока вартість випробувальної техніки та засобів вимірювання, складність реалізації в експерименті експлуатаційних умов, необхідність проведення великої кількості експериментів для накопичення необхідної статистики. У деяких випадках майже неможливо у лабораторних умовах імітувати схеми навантаження реальних конструкцій. На жаль, саме таким випадком є взаємодія колеса і рейки у реальних умовах.

Для експериментального дослідження контактної взаємодії коліс з рейками використовують, в основному, установки для вивчення процесів зношування в умовах тертя з коченням (так звані машини Амслера та їх модифікації), що обладнані засобами дефектоскопії [1, 2]. В Україні такі установки є, але потужність їх недостатня для відтворення в експерименті реальних тисків на границі контакту коліс рухомого складу і залізничних рейок.

В країнах Західної Європи є кілька дослідних установок для вивчення явищ контактної втоми матеріалів в умовах, які певною мірою імітують реальні умови взаємодії коліс рухомого складу з рейками. У рамках міжнародного проекту INNOTRACK [3] ці установки використовували як для вивчення причин появи втомних дефектів залізничних рейок, так і для дослідної перевірки кількох теоретичних моделей прогнозування зародження й подальшого розвитку контактно-втомних тріщин у рейках.

В університеті м. Шеффілд (Велика Британія) для цього використовують установку, що забезпечує контакт з проковзуванням двох циліндричних дисків, що обертаються. Диски виготовлені з рейкової і колісної сталі.

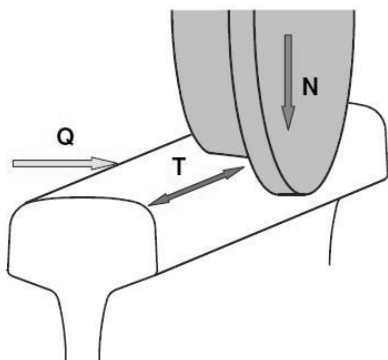


Рис. 1.

В австрійській фірмі Voestalpine Schienen GmbH для вивчення контактної втоми рейок і коліс рухомого складу використовують спеціальний стенд, у якому реалізується контакт реального колеса із шматком реальної рейки (схема взаємодії колеса з рейкою показана на рис. 1). В експерименті є можливість змінювати у досить широких межах величини контактного тиску N , поперечної Q і поздовжньої T сил.

Німецький експериментальний комплекс фірми Deutsche Bahn Technik/Beschaffung, схема якого показана на рис. 2, дозволяє змінювати в процесі досліджень не тільки величини вертикального і бічного контактного тиску, а й кути атаки та підуклонки.

Більш простими з точки зору апаратної реалізації є експериментальні випробування на циклічну витривалість за умов триточкового згину дослідних зразків, що вирізані з рейок [4].

Методика проведення таких досліджень щодо оцінки залишкового ресурсу рейок, які вилучені з експлуатації (вибір схеми та режимів силового навантаження, розмірів зразків, засобів вимірювання деформацій і дефектоскопії), буде докладніше розглянута у наступних публікаціях.

При експлуатаційних дослідженнях найбільш простим і тому досить поширеним є метод польових досліджень, який полягає у використанні результатів тривалих спостережень за виникненням і розвитком дефектів рейок у процесі експлуатації діючих ділянок залізничної колії [5]. Якщо такі дані отримані для різних ділянок колії, експлуатаційні умови (швидкість руху, якість рейок, тип рухомого складу, ступінь зносу коліс, кліматичні умови, тощо) на яких досить чітко визначені і не змінюються з часом, то можна побудувати аналітичні апроксимації (тобто най-

простіші математичні моделі) процесу накопичення пошкоджень певного типу у рейках від основних експлуатаційних факторів (наприклад, пропущеного тонунажу) або параметрів колії (наприклад, радіусу кривини).

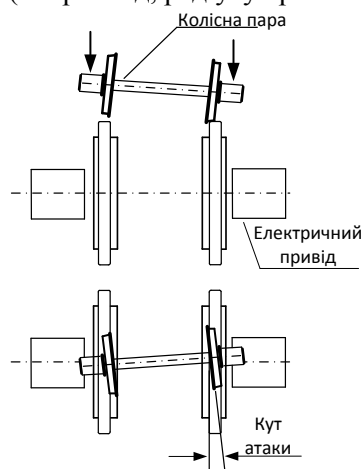


Рис. 2.

Точність такого прогнозування залежить від якості апаратного контролю стану рейок і тривалості спостережень. Можна констатувати, що для магістральних залізничних ліній такий метод в більшості випадків дає ненадійні результати внаслідок різноманітності рухомого складу. Основним недоліком методу є необхідність починати процес накопичення даних заново після кожної модернізації колії або рухомого складу. Для ліній метрополітену з урахуванням постійності експлуатаційних умов точність прогнозування може бути дещо вищою.

Загалом метод польових досліджень не дозволяє зробити узагальнюючих висновків, але може використовуватись для визначення термінів ремонтних робіт на окремих ділянках колії.

Іншим методом експлуатаційних досліджень є полігонний метод [6], який у порівнянні з попереднім дозволяє точніше враховувати умови експлуатації. Це, в першу чергу, обумовлюється певною визначеністю характеристик рухомого складу, що рухається по ділянці колії полігону. Однак дуже великі фінансові витрати на побудову спеціальних полігонів і велика тривалість і трудомісткість проведення експериментів зумовили незначне застосування цього методу у світі. Полігонний метод, зокрема, використовується у таких країнах, де побудовані спеціальні експериментальні полігони: в США, Японії, Німеччині, а також у Росії на експериментальному кільці ВНДІЖТу. В Україні, на жаль, експериментального полігону немає.

Для створення моделей прогнозування довговічності рейок на основі вище вказаних методів треба кілька років спостережень для накопичення необхідної статистики, тому у більшості країн відмовляються від продовження таких досліджень, віддаючи перевагу розробці теоретичних методів прогнозування на основі математичних моделей деформування, накопичення пошкоджень і руйнування матеріалів [7].

З розвитком обчислювальної техніки з'явилась можливість розраховувати поля напружень і деформацій в конструкціях складної форми за різних умов температурно-силового навантаження. На сьогодні основним чисельним методом розрахунку напружено-деформованого стану (НДС) елементів конструкцій є метод скінчен-

них елементів (МСЕ), теоретичні основи якого за останні 30 років добре розроблені. Це дало поштовх для швидкого розвитку теоретичних методів оцінки довговічності елементів конструкцій.

Протягом останніх 15 років проблема теоретичної оцінки довговічності елементів залізничних конструкцій притягує увагу багатьох дослідників [8 – 13]. Враховуючи важливість вказаної проблеми Європейська комісія об'єднала зусилля кількох країн для розробки інженерної методики прогнозування довговічності (проект INNTRACK [3, 14]).

Сучасний підхід до оцінки довговічності елементів конструкцій заснований на концепції пошкоджуваності матеріалу, під якою розуміють необоротні зміни в структурі матеріалу, що відбуваються в процесі експлуатації [15]. Кінетичний аспект руйнування особливо яскраво проявляється в умовах тривалого або циклічного навантаження [16]. Очевидно, що для такого прогнозування необхідно знати кінетику напружено-деформованого стану рейок при термосилових впливах, що імітують експлуатаційні. Для визначення кінетики НДС використовують чисельні методи механіки, зокрема, метод скінченних елементів.

При побудові розрахункової схеми задачі в МСЕ потрібно сформулювати геометричну модель, модель крайових умов і модель деформування матеріалу.

У методі скінченних елементів геометрична модель тривимірного об'єкта, що розраховується, являє собою сукупність елементарних об'єктів – скінченних елементів (тетраедрів, призм тощо), які наділені теплофізичними й механічними властивостями і поєднуються за допомогою логічних операцій. Положення скінченних елементів у деякій системі координат задається координатами їхніх вузлів. У результаті об'єкт може бути представлений у вигляді набору скінченних елементів (ребра яких утворюють просторову сітку), що заповнюють його об'єм і до- сить точно моделюють його поверхню.

Рейкова колія являє собою складну просторову конструкцію, що включає крім рейок також і шпали, прокладки, деталі кріплення рейок, а також баласт. Всі ці компоненти верхньої будови колії мають різну форму, сильно відрізняються розмірами, виготовлені з різних матеріалів, мають різні механічні й теплофізичні властивості й впливають на напружено-деформований стан рейок при навантаженні колесами рухомого складу. Принципово можливе створення геометричної моделі колії, яка б включала всі зазначені елементи. Однак варто мати на увазі ту обставину, що точність рішення крайової задачі в МСЕ дуже залежить від розміру скінченних елементів (при зменшенні розмірів точність зростає). Разом з тим при зменшенні розмірів елементів різко зростає їхня кількість, що приводить до значного росту обчислювальних витрат на рішення задачі або до неможливості розв'язання задачі за допомогою застосовуваного програмного забезпечення.

У цьому зв'язку є доцільним задачу про деформування рейкової колії під впливом навантаження від коліс рухомого складу розбити на кілька етапів і для кожного використовувати різні геометричні моделі. Зокрема, при розрахунку напружено-деформованого стану рейки інші елементи верхньої будови колії (прокладки, кріплення, шпали й т.п.) можна розглядати як деяку основу з усередненими механічними властивостями. На першому етапі можна обмежитися розглядом контактної взаємодії коліс рухомого складу з рейкою, що лежить на суцільній пружній основі з приведеними характеристиками механічних властивостей (наприклад, жорсткості) у різних напрямках.

У модель крайових умов входять умови навантаження конструкції (силові граничні умови), умови закріплення конструкції (кінематичні граничні умови) і початкові умови (наприклад, початковий розподіл технологічних напружень, що з'являються в результаті термообробки й виправлення рейок).

Для конкретизації силових умов навантаження (тобто визначення величин динамічних сил вертикального та бічного тиску) використовують дискретний або континуальний підходи. У першому розглядають вимушені або вільні коливання пружно-в'язкої механічної системи, яка моделює взаємодію візка рухомого складу з рейковою колією. При цьому використовують досить складні структурні схеми обох об'єктів [17]. Механічна поведінка вказаної системи описується системою звичайних диференціальних рівнянь. У другому підході використовують скінченно-елементну модель екіпажу, який взаємодіє з рейковою колією. За допомогою комерційних пакетів прикладних програм, які реалізують континуальний підхід (GenSys, ADAMS/Rail, NUCARS та ін.), можна визначити величини сил взаємодії між колесом і рейкою за різних умов контакту і режимів руху екіпажу.

Щодо рівня й розподілу початкових технологічних напружень, то вони також можуть бути знайдені при моделюванні процесів технологічної обробки рейок чисельними методами. Приклади вирішення цієї складної задачі можна знайти в роботах [18, 19].

Точність теоретичного прогнозування довговічності елементів конструкцій суттєво залежить від адекватності моделей механічної поведінки матеріалів. Вказані моделі (пружно-пластичного деформування, накопичення мікропошкоджень, руйнування тощо) можуть вважатися адекватними лише у тому разі, якщо вони достовірно описують механічну поведінку якогось класу матеріалів з урахуванням основних факторів – виду напруженого стану, температури, режиму навантаження. Розробка таких моделей потребує проведення великої кількості різноманітних лабораторних експериментів, вивчення фізичних процесів, що відбуваються в матеріалах при деформуванні і руйнуванні, раціонального накопичення й узагальнення експериментальних даних.

На жаль, до цього часу не створено універсальних математичних моделей механічної поведінки матеріалів, тому існують певні проблеми з теоретичною оцінкою довговічності реальних конструкцій.

У більшості комерційних пакетів прикладних програм, що реалізують МСЕ (ANSYS, NASTRAN, MARC й ін.), використовуються досить прості варіанти теорії пластичності, які не дозволяють описувати механічну поведінку реальних матеріалів при непропорційному циклічному навантаженні. Авторами розроблена структурна модель циклічно нестабільних матеріалів, що дозволяє врахувати вплив виду траєкторії деформування на закономірності циклічного зміцнення. Її докладний опис, математичне формулювання та результати дослідної перевірки наведені в роботах авторів [20 – 22].

Однією із найважливіших переваг теоретичних методів є можливість проведення чисельних експериментів, з яких можна встановити якісний і кількісний вплив різних факторів на поведінку розв'язку задачі. У нашому випадку доцільним є вивчення деяких експлуатаційних факторів на величини напружень і деформацій у зоні контакту коліс рухомого складу з рейкою. Такими факторами можуть бути, зокрема, швидкість руху, радіуси кривини колії, величина підуклонки, профілі поверхонь кочення коліс і рейок, механічні властивості матеріалів коліс і рейок, наявність дефектів різного роду та інші. А раціональне поєднання

теоретичних методів з експериментальними даними дасть можливість підвищити точність прогнозування довговічності й залишкового ресурсу рейок.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Markov D.* Laboratory tests for wear of rail and wheel steels // *Wear*. – 1995. – 183. – P. 678 – 686.
2. Поверхностная прочность материалов при трении / Б. И. Костецкий, И. Г. Носовский, А. К. Караулов и др. – К.: Техніка, 1976. – 296 с.
3. *INNTRACK report D4.3.4* «Calculation of contact stresses and wear». – 23 pp.
4. *Saarna M., Laansoo A.* Rail and rail weld testing // Proc. 4th Int. Conf. «Industrial Engineering – Innovation Edge for SME», 29 – 30th April 2004. – Tallinn, Estonia. – P. 217 – 219.
5. *Karpushenko N. I., Matvetsov V. I.* Wear of rails and rolling stock wheels // Proc. of IV-th Int. Symp. on Tribo-Fatigue. Section 3. Friction and Wear. – Ternopil, Ukraine, 2004. – P. 576 – 581.
6. *Колотушкин С. А., Рейхарт В. А.* Дефектоскопия рельсов экспериментального кольца на службе транспортной науки // Вестник ВНИИЖТ. – 2002. – № 6. – С. 33 – 36.
7. *Cannon D.F., Edel K.-O., Grassie S.L., Sawley K.* Rail defects: an overview // *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* – 2003. – 26. – P. 865 – 887.
8. *Ringsberg J.W., Bjarnehed H., Johansson B.L.* Rolling contact fatigue of railway rails – finite element modeling of residual stresses, strains and crack initiation // Proc. Inst. Mech. Eng., Part F, *J. Rail Rapid Transit.* – 2000. – 214. – P. 7 – 19.
9. *Sladkowski A., Sitarz M.* Analysis of wheel-rail interaction using FE software // *Wear*. – 2005. – 258. – P. 1217 – 1223.
10. *Kapoor A., Beynon J.H., Fletcher D.I., Loo-Morrey M.* Computer simulation of strain accumulation and hardening for pearlitic rail steel undergoing repeated contact // *J. Strain Analysis.* – 2004. – 39. – P. 383 – 396.
11. *Akama M.* Development of finite element model for analysis of rolling contact fatigue cracks in wheel/rail systems. // *Quart. Rep. of RTRI.* – 2007. – 48. – №1. – P. 8 – 14.
12. *Taraf M., Zahaf E.H., Oussouaddi O., Zegloul A.* Numerical analysis for predicting the rolling contact fatigue crack initiation in a railway wheel steel // *Tribology International.* – 2010. – 43. – P. 585 – 593.
13. *Johansson A., Pålsson B., Ekh M., et al.* Simulation of wheel–rail contact and damage in switches and crossing // *Wear*. – 2011. – 271. – P. 472 – 481.
14. *INNTRACK report D 4.3.5* «Simulation of materials deformation and RCF». – 2009. – 43 p.
15. *Коллинз Дж.* Повреждение материала в конструкциях. Анализ. Предсказание. Предотвращение. – М.: Мир, 1984. – 530 с.
16. *Yang L., Fatemi A.* Cumulative fatigue damage mechanisms and quantifying parameters: a literature review // *J. Testing & Evaluation.* – 1998. – 264. – № 2. – P. 89 – 100.
17. Молчанов В.М. Визначення пружнодинамічних параметрів колії та їх вплив на силову взаємодію на хрестовинах стрілочних переводів: автореф. дис. канд. тех. наук : 05.22.06/ – К.: ДЕТУТ, 2013. – 24 с.
18. *Ringsberg J.W., Lindbäck T.* Rolling contact fatigue analysis of rails including numerical simulations of the rail manufacturing process and repeated wheel-rail contact loads // *Int. J. Fatigue.* – 2003. – 25. – P. 547 – 558.
19. *Schleinzler G., Fischer F.D.* Residual stress formation during the roller straightening of railway rails // *Int. J. Mech. Sci.* – 2001. – 43. – P. 2281 – 2295.
20. *Косарчук В.В., Агарков О.В.* Моделювання циклічної нестабільності матеріалів при пружнопластичному деформуванні // 36. наук. праць ДЕТУТ. Серія «Транспортні системи і технології». – 2010. – 16. – С. 124 – 133.
21. *Косарчук В. В., Агарков О.В.* Ідентифікація параметрів моделі пружнопластичного деформування за результатами базових експериментів // 36. наук. праць ДЕТУТ. Серія «Транспортні системи і технології». – 2010. – 17. – С. 159 – 165.
22. *Косарчук В.В., Агарков О.В., Катерещук В.О., Рафальський О.* Експериментальна перевірка визначальних співвідношень структурної моделі пружно-пластичного середовища в умовах простого циклічного навантаження // 36. наук. праць ДЕТУТ. Серія «Транспортні системи і технології». – 2013. – 22. – С. 47 – 52.