



УДК 519.718

Н.В. СЕСПЕДЕС ГАРСІЯ*

ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ РЕЙОК ЗАЛІЗНИЧНИХ ДОРІГ

*Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

Анотація. Стаття присвячена визначенню сучасних методів оцінювання залишкового ресурсу залізничних рейок. Оскільки сталеві рейки є одним з основних компонентів залізничних перевезень, прогнозування терміну експлуатації, визначення залишкового ресурсу залізничних рейок мають важливе значення у забезпеченні безпечної експлуатації залізниць. Проаналізовано основні галузеві міжнародні та вітчизняні нормативні документи, досліджено загальний стан проблеми. Встановлено, що строк служби залізничних рейок обумовлений переважно ступенем динамічного навантаження, кількістю початкових дефектів при виготовленні, якістю сталі рейок, впливом кліматичних та електромагнітних навантажень. Досліджено методи та підходи до визначення залишкового ресурсу у світовій практиці, які базуються на проведенні експериментальних лабораторних випробувань на витривалість вилучених з експлуатації дефектних рейок. На основі виявлених механізмів формування та розвитку дефектів розробляють конкретні рекомендації з метою збільшення експлуатаційного ресурсу залізничних рейок. Але ці методи не враховують стохастичні аспекти фізики процесів деградації та руйнування. Тому найбільш ефективним методом визначення залишкового ресурсу різноманітних об'єктів є ймовірно-фізичний метод, який базується на аналізі динаміки зміни визначального параметра. Відповідно до методики ДСТУ 8646:2016, маючи дані про початковий, поточний та граничний пропущений тоннаж, при якому відмови рейок відсутні, наведено розрахунок залишкового ресурсу залізничних рейок. Розрахунки залишкового ресурсу ймовірно-фізичним методом на прикладі термооброблених рейок пасажирських залізничних доріг та використані відносні величини ресурсного параметра показали результати, які відповідають статистичним даним з експлуатації. Використання методу, який ґрунтується на DM-розподілі відмов, сприяє подовженню терміну використання рейок та зменшенню експлуатаційних витрат шляхом оптимізації процесів обслуговування та ремонту.

Ключові слова: ймовірно-фізичний підхід, залишковий ресурс залізничних рейок, DM-розподіл відмов, прогнозування довговічності.

Abstract. The article is devoted to defining modern methods for assessing the residual resource of railway tracks. Since steel rails are one of the main components of railway transportation, predicting the service life and determining the residual resource of rails are important for ensuring the safe operation of railways. The main sectoral international and domestic regulatory documents have been analyzed, and the general state of the problem has been investigated. It has been established that the service life of railway tracks is determined mainly by the degree of dynamic loading, the number of initial defects during manufacture, the quality of steel rails, and the influence of climatic and electromagnetic loads. Some methods and approaches to determining the residual resource in the world practice, which are based on experimental laboratory tests for the durability of decommissioned defective rails, have been studied. On the basis of the discovered mechanisms for the formation and development of defects, some specific recommendations have been developed in order to increase the operational resource of railway tracks. However, these methods do not take into account the stochastic aspects of the physics of degradation and destruction processes. Therefore, the most effective method for determining the residual resource of various objects is the probabilistic-physical method, which is based on the analysis of the dynamics of the change of the determining parameter. In accordance with the methodology of DSTU 8646:2016, given the data on the initial, current, and limited missed tonnage in which there are no rail failures, the calculation of the residual resource of railway rails is given. Calculations of the residual resource using the probabilistic-

physical method on the example of heat-treated rails of passenger railways and using the relative values of the resource parameter have shown results that correspond to statistical data from the operation. The use of the method based on DM-distribution of failures helps to extend the life of rails and reduce operating costs by optimizing maintenance and repair processes.

Keywords: *probabilistic-physical approach, residual resource of railway tracks, DM-distribution of failures, durability prediction.*

DOI: 10.34121/1028-9763-2024-1-87-95

1. Вступ

Залізничний транспорт в Україні є основною галуззю в дорожньо-транспортній системі перевезень, який забезпечує понад 82% вантажних та 36% пасажирських перевезень різноманітними видами транспорту. За обсягами вантажних перевезень українські залізниці знаходяться на четвертому місці в Євразії, випереджаючи лише Китай, РФ та Індію. Обсяг перевезень на 1 км залізницями України перевищує відповідний показник у розвинених європейських країнах у 3–5 разів.

Важливість залізничного транспорту в Україні підсилюється тим фактом, що на території країни пролягають ключові транспортні коридори, які з'єднують Схід і Захід, а також Балтику і Чорне море в системі транспортних перевезень. Також залізничний транспорт – це важлива складова в економіці країни. Так, близько 60% аграрної продукції потрапляють до портів за допомогою залізничного транспорту. Щодо руди, металів, гірничо-металургійної продукції, то всі 90% експорту постачаються до портів саме залізницею. Що ж до пасажирського транспорту, то є потреба у збільшенні швидкості проходу поїздів, а це, у свою чергу, збільшує вимоги до якості та надійності рейок залізничних доріг.

Оскільки сталеві рейки є одним з основних компонентів залізничних перевезень, прогнозування терміну експлуатації, визначення залишкового ресурсу залізничних рейок мають важливе значення у забезпеченні безпечної експлуатації залізниць.

Мета дослідження – визначення сучасних методів оцінювання залишкового ресурсу залізничних рейок, аналіз та дослідження можливості використання ймовірно-фізичної методології розрахунку залишкового ресурсу рейок, використовуючи відносні величини ресурсного параметра.

2. Стан проблеми та аналіз останніх досліджень

Загальна протяжність залізничних доріг в Україні складає більше 27 000 км. Враховуючи наявність окупованих територій, де залізнична мережа на сьогодні не використовується, практична довжина мережі залізничних доріг України складає 19800 км, з яких понад 47,2% мають електрифікований режим.

Українські залізничні мережі межують та взаємодіють із залізницями Польщі, Румунії, Словаччини, Угорщини, Білорусі, РФ та Молдови. Вони також забезпечують функціонування 40 міжнародних залізничних переходів і обслуговують 18 морських портів у Чорноморсько-Азовському басейні [1]. Територією України проходять 3 міжнародні залізничні транспортні коридори: №№ 3, 5, 9. Українські порти Ізмаїл і Рені служать точками взаємодії з пан'європейським коридором № 7, який пролягає вздовж річки Дунай. На сьогоднішній день українська національна мережа транзитних залізничних коридорів має довжину 3162 км. Загальний робочий парк пасажирських вагонів становить 3,1 тис. одиниць. Також у наявності є 10 одиниць швидкісних електропоїздів «Hyundai» та 2 одиниці швидкісних електропоїздів «Тарпан». Загальний парк вантажних вагонів становить 83,5 тис. одиниць [1].

Так як основна частина залізничного полотна в Україні зношена й потребує ремонту, то як міру безпеки приходиться встановлювати обмеження швидкості. Але, не зважаю-

чи на запроваджені протиаварійні заходи, кількість сходження поїздів із рейок в Україні залишається високою.

Проблеми руйнування залізничних доріг існують у кожній країні світу. Згідно з висновком Державного транспортного відомства Швеції, близько 6% усіх залізниць королівства можуть бути небезпечними для перевезення пасажирів і вантажів [2]. На деяких ділянках тріщини в полотні сягають одного метра. Ця проблема виникає і через погану якість металу, що було виявлено контролюючими органами. Особливу небезпеку становить перегін довжиною 300 км між Мельбю (Mølby) та Хеслехольмом (Hässleholm) на півдні Швеції. Він використовується для руху швидкісних пасажирських поїздів, що розганяються до 200 км на годину. Це створює додаткове навантаження на рейки. Навіть невеликий дефект металу на такій швидкості може спричинити катастрофу.

Надійність рейок залежить від ступеня динамічного навантаження поїздів, яке впливає на глибину, довжину та форму нерівностей рейок. Із часом деякі нерівності зникають, але глибина багатьох залишених збільшується, що є однією з основних причин виникнення пошкоджень та появи хвильового зносу. Також початкові нерівності при виробництві рейок сприяють появі дефектів, включаючи ті, що мають контактну-усталений характер. Для довговічності рейок та зі збільшенням швидкості руху поїздів важливе значення має пряmolінійність поверхні катання рейок.

Під час експлуатації рейки піддаються впливу різноманітних факторів, включаючи силові, кліматичні та електромагнітні [3]. Головний вплив на стан рейок залежить від силових навантажень, які обумовлені типом рухомого складу, швидкістю та інтенсивністю руху, станом залізничних колій та іншими факторами. Кліматичні умови впливають на температурні напруження, швидкість корозії та інші види пошкоджень. Електромагнітні поля високої щільності можуть викликати зміни в мікроструктурі матеріалу рейки та, відповідно, впливати на його механічні властивості [3].

Характеристики конструкції та геометричні параметри місць контакту між рейками та колесами рухомого складу також суттєво впливають на розподіл напружень та деформацій у рейках, що призводить до появи пошкоджень та дефектів, і мають значний вплив на довговічність рейок [3]. Для моніторингу збільшення розмірів існуючих дефектів рейок або можливого виникнення нових рекомендується проводити періодичну дефектоскопію за допомогою ультразвукового дефектоскопу.

Стосовно визначення залишкового ресурсу рейок існують різні методи та підходи. Так, у роботі [4] зазначено, що для проведення експериментальних досліджень залишкового ресурсу дефектних рейок під навантаженням рекомендується використовувати метод випробувань на міцність на пульсаційних машинах в умовах, які схожі на експлуатаційні у рейках. Якщо під час випробувань дефектні рейки виявляють відмінну витривалість, це може свідчити про можливість подовження їх робочого ресурсу. Також для дослідження критичних умов використовують метод тестування зразків на максимальне навантаження. За результатами лабораторних випробувань було визначено залишковий ресурс рейок типу P50 та збільшено нормативні терміни служби на 33 % для рейок типу P65 та P50 в умовах експлуатації метрополітену [4].

У роботі [5] проведено дослідження залишкового ресурсу несучих конструкцій платформ із терміном служби 25 років. Для цього було досліджено розподіл залишкових напруг термооброблених рейок та створено тривимірну пружнопластичну кінцево-елементну модель контакту колеса з рейкою. У модель було включено вплив початкових напруг, що виникають у процесі виготовлення рейок, та вивчено ефект повторних проходів прокатки. Досліджено розподіл залишкових напруг рейок при різних навантаженнях на колеса, коефіцієнтах тертя та швидкостях поздовжньої повзучості. Аналіз кінцевих елементів показує, що в межах обмеженої просторової області, порушеної контактом колеса і рейки, різниця між поздовжньою залишковою напругою з початковою напругою і поздовжньою залишко-

вою напругою без початкової напруги стає досить малою після достатньої кількості проходів прокатки (10 прокаток) [5]. Однак початкові напруги суттєво впливають на розподіл поздовжньої залишкової напруги рейки за межами зони контакту. Великий вплив на поздовжні залишкові напруги на поверхні та по глибині рейки надає швидкість поздовжньої повзучості. Авторами також зазначено, що деякі умови роботи моделі спрощені. Наприклад, необхідно додатково досліджувати вплив зношених рейок та зношених коліс на розподіл залишкових напруг [5].

Авторами [6] на основі поділу рейок на нерізно вигнуті відрізки та різко вигнуті відрізки розроблено модель оцінки залишкового терміну служби ділянок залізниць із використанням методу дискретного стану. Запропоновано метод умовної ймовірності, що ґрунтується на аналізі характеристик зносу рейок. Модель враховує кілька гетерогенних чинників визначення їхнього впливу на процес руйнування і показує, що оцінка залишкового терміну служби залізничних ділянок можлива. Розроблена модель перевірена у Пекинському метрополітені. Були отримані дані про різнорідні фактори (розміри рейок, річний тоннаж, тип полотна, максимальний градієнт зносу стану ділянок колій) для прогнозування залишкового терміну служби рейок, які порівнювалися з їхнім фактичним терміном служби [6]. Встановлено, що модель добре узгоджується з цим типом рейок, методами збору даних та технічного обслуговування метрополітену й рекомендована для використання керівництвом залізниці.

Стосовно нормативних документів на виробництво та використання залізничних рейок існує стандарт EN 13674-1. Європейські та інші залізничні компанії, підрядники та виробники, які дотримуються європейських стандартів, застосовують цей стандарт для забезпечення того, щоб рейки, які вони виробляють або використовують, відповідали всім необхідним характеристикам та властивостям [7]. Цей стандарт є важливим для забезпечення безпеки та надійності залізничних колій, а також для сприяння експлуатаційній сумісності залізниць між різними країнами та регіонами.

Стандарт EN 13674-1 розповсюджується на різні марки рейок, такі як R200, P220, P260, P260Mn, P320Kp і R350HT[7]. Кожна з них характеризується власними механічними властивостями та вимогами. У стандарті визначені вимоги до таких видів рейок: рейки із плоским дном, рифлені рейки, рейки для стрілочних переїздів та підкранові рейки, які використовуються на залізничних коліях [7]. Стандартом EN 13674-1 визначено геометричні та розмірні характеристики, також визначено механічні властивості рейок, вимоги до якості поверхні, встановлено вимоги до допусків та інші характеристики. У стандарті містяться рекомендації щодо методів випробувань та критеріїв приймання залізничної продукції.

Стандартом EN 13674-1 визначено вимоги до хімічного складу та механічних властивостей сталевих рейок, що застосовуються у залізничних коліях. Хімічний склад рейкової сталі повинен відповідати зазначеним межах по вуглецю, марганцю, кремнію, фосфору, сірці та іншим елементам [7]. Механічні властивості рейкової сталі вказані з точки зору її межі плинності, міцності на розтяг, подовження та ударної в'язкості.

Європейський стандарт EN 13674-1 є стандартом для залізничних рейок і використовується у багатьох європейських країнах, таких як Франція, Німеччина, Італія, Іспанія, Великобританія, Бельгія, Нідерланди, Швеція, Норвегія, Швейцарія. Інші країни за межами Європи також можуть використовувати цей стандарт, якщо вони ухвалюють європейські залізничні стандарти або мають залізничні системи, сумісні з європейськими залізницями.

Стосовно вітчизняних та взаємопов'язаних стандартів існує велика кількість нормативних документів щодо вимог до виробництва, обладнання, на якому виготовляються рейки, складу металу рейок, методів відбору проб для визначення хімічного складу, методів випробувань рейок за різними факторами та ін.

Основний документ у цій галузі – це ДСТУ 4344:2004. Згідно з ДСТУ 4344:2004, залізничні рейки виготовляються типів Р50, Р65 і Р75 із використанням вуглецевої або вуглецевої мікролегованої сталі і доступні в таких виконаннях: з болтовими отворами на обох кінцях (для з'єднання з іншими елементами залізничного шляху), на одному кінці, без болтових отворів. Обране виконання рейки залежить від конкретних вимог і умов, в яких вони будуть використовуватися на залізничному шляху. Середня довжина рейок становить від 12 до 25 метрів [8].

ДСТУ 4344:2004 встановлюються вимоги щодо хімічного складу рейкових сталей та межі по вуглицю, марганцю, кремнію, ванадію, титану, фосфору, сірці та алюмінію. ДСТУ 4344:2004 встановлюються вимоги щодо механічних характеристик металу рейок під час тестування на розтяг. Згідно з цим стандартом у рейках не допускаються дефекти та включення – розшарування, плямисті ліквіації, тріщини, чужорідні неметалеві і шлакові домішки, наявність темних та світлих корочок, що впливає на міцність, якість, довговічність та надійність рейок. Також процес виробництва рейок повинен забезпечувати відсутність дефектів у формі флокенів у структурі рейок [8].

ДСТУ 4344:2004 передбачає, що під час проведення копрових випробовувань рейковий тестовий зразок повинен витримувати удар вантажем масою 1000 кг, який падає з висоти від 3 до 8 метрів, в залежності від типу рейок, без будь-якого зламу чи ознак руйнування після проведення випробувань [8]. Також за нормами ДСТУ 4344:2004 необхідно проводити контроль на ударну в'язкість рейок.

У поверхнево-загартованих рейках, які були піддані виправленню, можуть існувати залишкові напруження. Залишкові напруження можна визначати за допомогою неруйнівних методів контролю, які передбачені узгодженою з інспекцією «Укрзалізниці» методикою.

Відповідно до ДСТУ 4344:2004 контроль якості виготовлення та передача рейок на зберігання здійснюються виробничо-технічною комісією (ВТК) підприємства-виробника. Технічне приймання рейок проводиться Інспекцією «Укрзалізниці» або іншим контролюючим органом. Цим органам надається право проводити вибірковий контроль технології виготовлення рейок, брати проби з будь-якої плавки рейок і спільно з ВТК підприємства-виробника виконувати необхідні додаткові випробовування і перевірки якості виготовлених рейок відповідно до цього стандарту [8].

Згідно з ДСТУ 4344:2004, рейки також проходять ультразвуковий контроль для виявлення можливих внутрішніх дефектів за методикою, яка розробляється (або використовується) підприємством-виробником. Параметри дефектів і методика контролю погоджуються зі споживачем перед виконанням контролю, щоб забезпечити відповідність вимогам і очікуванням сторін.

Контроль твердості на поверхні катання поверхнево-загартованих рейок всіх категорій виконується для кожної рейки за допомогою неруйнівного контролювання або іншого методу, який забезпечує необхідну точність вимірювань. Одним із допустимих методів для контролю твердості поверхнево-загартованих рейок є метод Брінелля [8].

Механічні властивості рейок контролюють за допомогою статистичних або неруйнівних методів, відповідно до методики, яка розробляється підприємством-виробником та погоджується із споживачем.

3. Постановка задачі

Результати останніх досліджень свідчать про те, що визначення залишкового ресурсу залізничних рейок базується на проведенні експериментальних лабораторних випробувань на витривалість вилучених з експлуатації дефектних рейок. Дослідження стійкості рейок з виявленими дефектами під час випробувань дозволяють докладно розібратися у механізмах формування та розвитку дефектів. На цій основі розробляють конкретні рекомендації з

метою збільшення експлуатаційного ресурсу залізничних рейок. Але ці методи не враховують стохастичні аспекти фізики процесів деградації та руйнування.

Рейки, які в основному експлуатуються на головних шляхах залізничної дороги, є найміцнішими у світі за згинальною міцністю, але поступаються кращим зарубіжним зразкам по чистоті сталі, прямолінійності та ресурсу (довговічності та безвідмовності). Головною причиною відмов є дефекти в основному контактено-утомного походження. Дефекти зароджуються на стадії виплавки, розливу та обробки металу, а потім з'являються при прокатці та термообробці. З часом та збільшенням обсягу експлуатації на рейках накопичуються різноманітні ушкодження. Це включає деформації, пошкодження та дефекти від втоми, які спричиняють зниження надійності рейок. Частіше виникають відмови та потреба у зниженні швидкості або припиненні руху поїздів. До завершення регламентованого терміну служби рейки мають певний рівень зносу та дефекти і можуть деякий час експлуатуватися.

Останні дослідження у сфері визначення залишкового ресурсу різноманітних об'єктів показують, що найбільш ефективними є ймовірно-фізичні методи. Ці методи базуються на аналізі динаміки зміни визначального параметра й надають більш точні дані при оцінці об'єктів, відображають справжність процесів руйнування та деградації, що дає можливість прогнозувати час досягнення їх критичних значень [9].

4. Ймовірно-фізичний метод розрахунку залишкового ресурсу

Рейки є однією з найбільш пошкоджуваних складових залізничної колії й вимагають своєчасного контролю, а у разі необхідності – заміни. Відповідно до методики ДСТУ 8646:2016, маючи дані про початковий, поточний та граничний пропущений тоннаж, при якому відмови рейок відсутні, можна розрахувати залишковий ресурс цих рейок та використовувати їх ще певний час.

Приклад розрахунку залишкового ресурсу термооброблених рейок пасажирських залізничних доріг

Обчислити показники залишкового та гамма-процентного залишкового ресурсу термооброблених рейок (ТР) пасажирських залізничних доріг на момент напрацювання $t_u = 5000000$ цикл.

Результати вимірів ресурсного(визначального) параметра ТР пасажирських залізничних доріг представлені в табл. 1, де позначено: x – пропущений тоннаж у відносних одиницях ($x = \frac{m_0}{m}$, де m_0 , m – відповідно, початковий і поточний пропущений тоннаж, при якому відмови рейок відсутні, Δx_i – приріст параметра x за i -й інтервал).

Параметр x представляється ресурсним(визначальним) параметром. При цьому встановлено, що (при початковому пропущеному тоннажу $m_0 = 25$ млн тон брутто) граничне значення пропущеного тоннажу $\Pi = 300$ млн тон брутто / 250 млн тон брутто=1,5. Інтервал $\Delta t = 10^6$ циклів.

Згідно зі статистичними даними, відмови рейок настають при пропущеному тоннажу у 350 млн тон брутто та більше.

Відповідно беремо такі вхідні дані:

- 300 млн тон брутто – відмови рейок відсутні;
- 25 млн тон брутто / 250 млн тон брутто=0,1 – початкове значення пропущеного тоннажу у відносних одиницях;
- 50 млн тон брутто / 250 млн тон брутто=0,2 – значення пропущеного тоннажу у відносних одиницях на момент напрацювання 1000000 циклів;

• 300 млн тон брутто / 250 млн тон брутто=1,5 – граничне значення пропущеного тону у відносних одиницях.

Рішення

Оскільки основними процесами руйнування ТР, що призводять до відмов, являються знос, багатоциклова втома (контактна і об’ємна), то як теоретичну модель розподілу ресурсу термооброблених рейок (ТР) пасажирських залізничних доріг приймаємо *DM*-розподіл [10].

Використовуючи результати попередніх вимірів (дані табл. 1), зокрема, результати вимірів визначального параметра (x), отримуємо такі оцінки характеристик зміни визначального параметра.

Оцінку коефіцієнта варіації приростів (швидкості зміни визначального параметра) обчислюємо за формулою [10]

$$v_x = v = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta\varphi_i - \tilde{\Delta}\varphi)^2} / \tilde{\Delta}\varphi = 0,61.$$

Таблиця 1 – Результати попередніх вимірів

Напрацювання в циклах N	Пропущений тону у відносних одиницях	
	x	Δx_i
1000000	0,2	0,1
2000000	0,3	0,1
3000000	0,6	0,3
4000000	0,9	0,3
5000000	1,0	0,1

Оцінку середньої швидкості зміни визначального параметра ТР [10] за формулою

$$a = \frac{1}{\Delta t \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n [\varphi(t_{i+1}) - \varphi(t_i)] = \frac{\tilde{\Delta}\varphi}{\Delta t} = 0,9/1000000 \cdot 5 = 1,8 \cdot 10^{-7} \text{ млн тон/цикл.}$$

Оцінку середнього ресурсу ТР за формулою

$$T_{cp} = \frac{(\Pi - \Pi_o)}{a} = \frac{(1,5 - 0,1)}{1,8 \cdot 10^{-7}} = 7,7777 \cdot 10^6 \text{ цикл.}$$

Обчислюємо середній залишковий ресурс ТР за формулою [10]

$$\tilde{\pi}(\tau) = \frac{(\Pi - \Pi_1)}{a} \left(1 + \frac{v^2}{2} \right). \tag{1}$$

Оцінку середнього залишкового ресурсу (після напрацювання $t_u = 5 \cdot 10^6$ цикл і значення визначального параметра $\Pi_1 = 1,0$) розраховуємо за формулою

$$\pi(\tau) = \frac{(\Pi - \Pi_1)}{a} \left(1 + \frac{v^2}{2} \right) = \frac{(1,5 - 1)}{1,8 \cdot 10^{-7}} \left(1 + \frac{0,61^2}{2} \right) = 3294583,333 \text{ цикл.}$$

Обчислюємо гамма-процентний залишковий ресурс за формулою (для $\gamma = 0,95$) [10]

$$\tilde{\pi}_\gamma(\tau) = \frac{(\Pi - \Pi_1)}{a} \left(1 + v^2 U_\gamma^2 / 2 - v U_\gamma \sqrt{1 + \frac{v^2 U_\gamma^2}{4}} \right), \quad (2)$$

де U_γ – квантиль нормованого нормального розподілу рівня $\gamma=0,95$.

$$U_\gamma = 1,645.$$

$$\begin{aligned} \tilde{\pi}_\gamma(\tau) &= \frac{(\Pi - \Pi_1)}{a} \left(1 + v^2 U_\gamma^2 / 2 - v U_\gamma \sqrt{1 + \frac{v^2 U_\gamma^2}{4}} \right) = \\ &= \frac{(1,5 - 1)}{1,8 \cdot 10^{-7}} \left(1 + 0,61^2 \cdot 1,645^2 / 2 - 0,61 \cdot 1,645 \sqrt{1 + \frac{0,61^2 \cdot 1,645^2}{4}} \right) = \\ &= 2777778 \cdot (0,3807896) = 1057748,97 \text{ цикл.} \end{aligned}$$

Розрахунки залишкового ресурсу термооброблених рейок (ТР) пасажирських залізничних доріг ймовірно-фізичним методом показали результат у 3 млн циклів додаткової експлуатації вищевказаних рейок. Розрахунковий гамма-процентний залишковий ресурс у 1 млн циклів експлуатації показує, що даний тип рейок можна експлуатувати ще 1 млн циклів із вірогідністю відмови 95%.

5. Висновки

Стан залізничних рейок обумовлений переважно строком служби рейок, ступенем динамічного навантаження, кількістю початкових дефектів при виготовленні, якістю сталі рейок. Під час експлуатації на рейки впливають також кліматичні та електромагнітні навантаження, що у комплексі з вищевказаними факторами викликає температурні напруження, корозію, тріщини, сколи, стирання, різні механічні руйнування рейок. Все це головним чином впливає на загальний строк служби залізничних рейок. Тому якісний контроль на всіх етапах виготовлення та експлуатації рейок, моніторинг дефектів після досягнення певної кількості циклів навантаження, розрахунки залишкового ресурсу рейок залишаються актуальними питаннями у залізнично-транспортній системі.

Розрахунки залишкового ресурсу ймовірно-фізичним методом на прикладі термооброблених рейок пасажирських залізничних доріг та використанні відносні величини ресурсного параметра показали результати, які відповідають статистичним даним з експлуатації. Враховуючи це, можна зробити висновок, що обраний метод слід використовувати для подальших розрахунків. Використання методу, який ґрунтується на *DM*-розподілі відмов, що враховує випадковість та невизначеність у процесах руйнації та деградації, дозволяє прогнозувати довговічність та досить точно вираховувати залишковий ресурс об'єктів. Крім того, метод сприяє зменшенню експлуатаційних витрат шляхом оптимізації процесів обслуговування та ремонту.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Інформація про Українські залізниці. URL: <https://mtu.gov.ua/content/informaciya-pro-ukrainski-zaliznici.html>.
2. Больше тысячи километров шведских железных дорог опасны для пассажиров. URL: <https://dzen.ru/a/W2QzOdWKMwCoriL>.
3. Даніленко Е.І., Косарчук В.В., Пилипенко А.П., Йосифович Р.М., Рафальський О.Ю. Обґрунтування методики експериментальної оцінки залишкового ресурсу рейок залізничної колії метрополітену. *Збірник наукових праць ДЕТУТ. Транспортні системи і технології*. 2015. Вип. 26–27. С. 26–38.

4. Йосифович Р.М. Дослідження залишкового ресурсу дефектних рейок типу P50 із випробуваннями на циклічну витривалість. Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. 2015. № 6 (60). С. 78–85.
5. Li Ya., Chen J., Wang J., Zhao H., Chen L. Study on the residual stress distribution of railway rails. Vol. 234, Issue 23. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0954406220927069>.
6. Bai W., Sun Q., Wang F., Liu R., An R. A segmental evaluation model for determining residual rail service life based on a discrete-state conditional probabilistic method. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1748006X18768916>.
7. Железнодорожный стандарт EN 13674-1. Знакомство. URL: <https://www.railwayrail.com/ru/the-railway-rail-standard-of-en-13674-1-introduction/>.
8. ДСТУ 4344:2004. Рейки звичайні для залізниць широкої колії. Загальні технічні умови. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=28821.
9. Стрельников В.П., Федухин А.В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. К.: Логос, 2002. 486 с.
10. ДСТУ 8646:2016. Надійність техніки. Оцінювання та прогнозування залишкового ресурсу (терміни служби) технічних систем. URL: http://www.immsp.kiev.ua/activity/Napriam%20Standarty/Standart_Zalyshkovij_resurs.pdf.

Стаття надійшла до редакції 12.12.2023