

МОДЕЛЮВАННЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК В КОЛІЇ

В статті здійснюється моделювання життєвого циклу рейок в колії з метою визначення і прогнозування їх стану в будь-який момент часу.

В статье осуществляется моделирование жизненного цикла рельсов в пути с целью определения и прогнозирования их состояния в любой момент времени.

The life cycle modelling of rails in a track is carried out in the paper with the purpose of definition and forecasting of their condition at any moment.

Безперебійний і безпечний пропуск поїздів з встановленою швидкістю – основні функції, котрі повинна забезпечувати залізнична колія. Надійність колії – це її властивість зберігати значення цих параметрів. Перспективною і об'єктивною оцінкою стану колії є оцінка стану колії за показниками надійності: показники безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності [1].

Залізнична колія – багатoelementний ремонтпридатний і відновлюваний об'єкт надійності. Основна вимога, яка повинна забезпечуватись – це безперервність роботи. Найважливішим елементом залізничної колії є рейки, тому що відмова однієї рейки приводить до відмови колії в цілому. Щоб забезпечити надійність залізничної колії перш за все потрібно змоделювати стан рейок.

Розробкою моделей відмов рейок займалися і займаються багато вчених ВНІЖТу, МПТу, НІЖТу, ДПТу [2–7]. Авторами запропоновані багато різноманітних моделей стану рейок, переважно це математичні моделі розрахунку контактно-втомленої довговічності рейок. В цих випадках дослідження основані на плоскій моделі Веллера або гіпотезі Майнера. Протиріч між вказаними гіпотезами і моделями не має і кожна може бути використана для розв'язку тої часткової задачі, яка ставиться перед ними.

Недоліком існуючих моделей є те, що надійність роботи рейок оцінюється за одним видом дефектів.

Необхідність розробки моделі життєвого циклу рейок основана на тому, що на сьогоднішній день ніякими нормативно-технічними документами не визначено показники надійності рейок. В наукових колах є різні думки навколо даної проблеми, наприклад Лисюк В. С. запропонував математичні моделі теорії масового обслуговування систем «бригада-колія», «залізнична колія», використовуючи п'ять основних

критеріїв на основі яких оцінюється граничне значення кількості одиночного виходу рейок [7], але вони не відображені в цих документах. Потрібно детально дослідити і розробити показники надійності на основі яких можна буде змоделювати життєвий цикл рейок. Це дозволить визначити і прогнозувати стан рейок в будь-який момент часу.

Ми пропонуємо загальну математичну модель життєвого циклу рейок, яка включає всі види дефектів і систему технічного обслуговування (поточне утримання колії і ремонти). Хоча дефекти контактно-втомленого походження займають основне місце, але звертаючи увагу на статистику по відмовах рейок за останні роки [8], також потрібно включати інші дефекти.

При розробці моделі життєвого циклу рейок керуємося наступними передумовами. Рейки, вкладені на конкретній ділянці, розглядаються як сукупність однакових елементів, кожний з яких характеризується випадково – закономірною невід'ємною величиною пропущеного тоннажу t .

На основі аналізу нормативно-технічної документації експлуатації рейок [9, 10] розроблено граф їх стану (рис. 1). На графі зображено всі можливі стани рейок. Справний стан для головних колій прийнято такий, при якому забезпечується швидкість пасажирських поїздів 140 км/год, а вантажних 90 км/год (стан 0 на рис. 1) Граничний стан рейок – є повною відмовою і рух по них заборонено (стани 5, 16, 17, 20, 30, 35).

Стани рейок з'єднані між собою потоками відмов і відновлення. Потоки відмов $\lambda_i(t)$ – це інтенсивність накопичення дефектів і пошкоджень в рейках, а потоки відновлення $\mu_i(t)$ характеризують інтенсивність виконання робіт по їх усуненню або попередженню. Головним

Профілактичні роботи

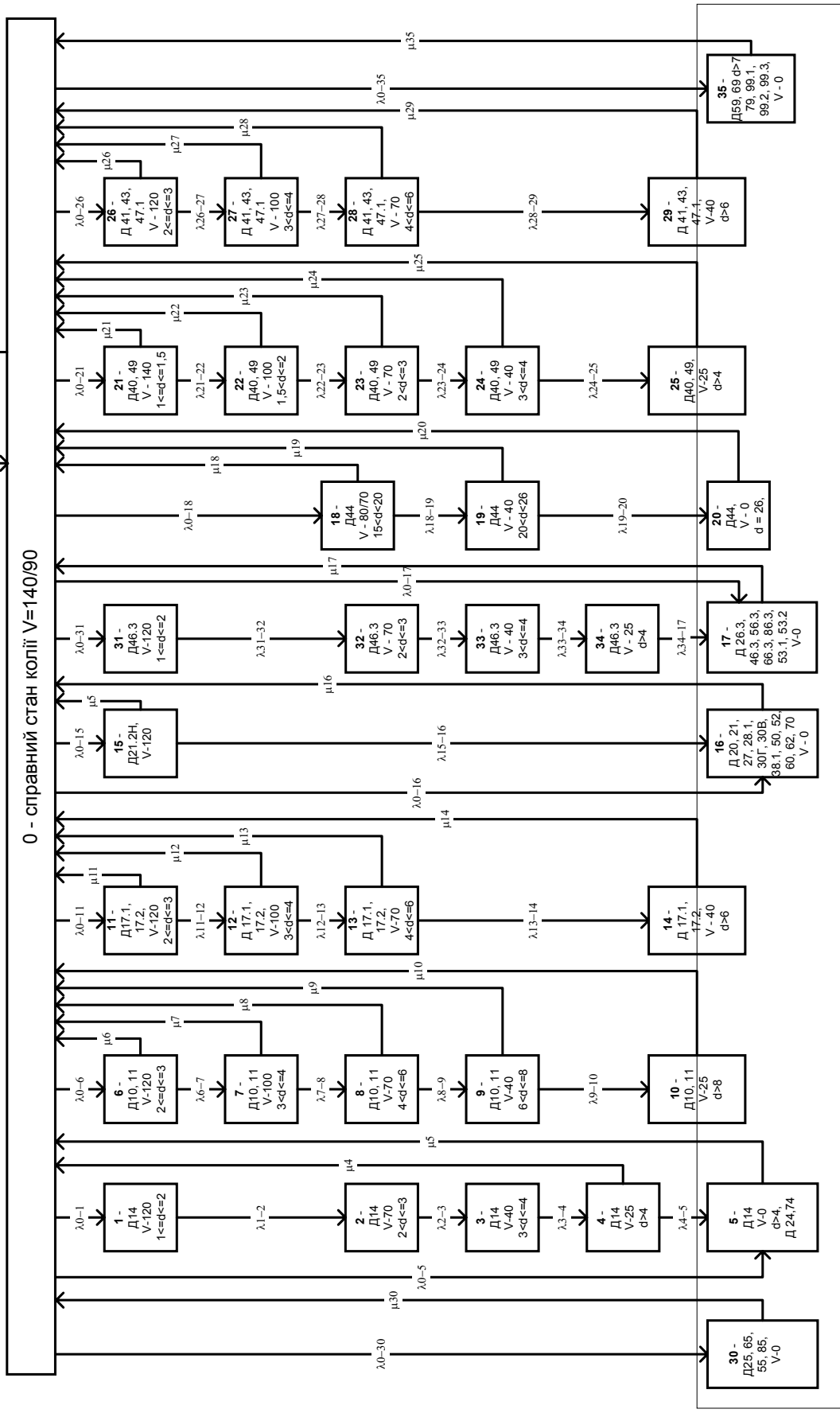


Рис. 1 . Граф станів рейок

методом отримання відомостей відносно надійності рейок є обробка статистичної інформації про відмови з визначенням їх інтенсивності. Обробка дозволяє визначити закон розподілу часу безвідмовної роботи і прогнозувати всі показники надійності об'єкта. Функція інтенсивності відмов залежить від пропущеного тону напруження, вантажонапруженості, осьового навантаження на вісь, швидкості, радіусу кривої, максимально-допустимих величин накопичуваль-

них пошкоджень чи деформацій, рівня напружень від динамічного навантаження. Функція відновлення залежить від системи утримання колій, яка прийнята на залізницях. Якщо показники від яких вона залежить постійні, то вона описується за експоненціальним законом.

В табл. 1 приведено перелік інтенсивностей потоків відмов і відновлення відповідно до дефектів рейок.

Таблиця 1

Інтенсивності відмов та відновлення рейок

Найменування інтенсивності відмов	Позначення	Найменування відповідної інтенсивності відновлення	Позначення
Поперечні тріщини в голівці рейки, тріщини в шийці, підшві, вигини внаслідок механічної дії (дефект 25, 55, 65, 85)	λ_{030}	Негайна заміна рейки. Планова заміна рейки при відсутності тріщини	μ_{30}
Поперечні тріщини в голівці та злами рейок внаслідок специфічної дії рухомого складу (дефект 24, 74)	λ_{05}	Негайна заміна рейки	μ_5
Впадини на поверхні голівки від дії коліс рухомого складу при буксуванні (дефект 14)	$\lambda_{01}, \lambda_{12}, \lambda_{23}, \lambda_{34}, \lambda_{45}$	Заміна в першу чергу рейок. Негайна заміна рейок	μ_4 μ_5
Відлущення і викришування металу на поверхні кочення голівки за дефектами 10, 11	$\lambda_{06}, \lambda_{67}, \lambda_{78}, \lambda_{89}, \lambda_{910}$	Шліфування рейок за встановленим графіком. Заміна рейок в першу чергу	$\mu_6, \mu_7,$ μ_8, μ_9 μ_{10}
Відлущення і викришування металу на поверхні кочення голівки за дефектами 17.1, 17.2, 18	$\lambda_{011}, \lambda_{1112}, \lambda_{1213}, \lambda_{1314}$	Наплавлення рейок за типовим технологічним процесом. Заміна рейок в першу чергу	$\mu_{11}, \mu_{12},$ μ_{13} μ_{14}
Поперечні, повздовжні горизонтальні і вертикальні тріщини в голівці рейки (дефекти 20, 21, 27, 28.1, 30В, 30Г, 38.1, 50, 52, 60, 62, 70)	$\lambda_{016}, \lambda_{1516}$	Негайна заміна рейок	μ_{16}
Поперечні тріщини, що не виходять на поверхню рейки (дефект 21.2Н)	λ_{015}	Встановлення накладок на пошкоджене місце рейок	μ_{15}
Поперечні тріщини в голівці, тріщини в шийці, підшві, вигини рейок (дефекти 26.3, 56.3, 66.3, 86.3) а також зім'яття голівки понад 6 мм (46.3) внаслідок порушення технології зварювання рейок. Тріщини в шийці від болтових отворів (53.1, 53.2)	$\lambda_{017}, \lambda_{3417}$	Негайна заміна рейок	μ_{17}
Боковий знос голівки рейки (дефект 44)	$\lambda_{018}, \lambda_{1819}, \lambda_{1920}$	Змашування рейок, коліс. Планова заміна рейок. Негайна заміна рейок	μ_{18}, μ_{19} μ_{20}
Довгі та короткі хвилеподібні деформації на поверхні кочення голівки рейки (дефект 40 і 49)	$\lambda_{021}, \lambda_{2122}, \lambda_{2223}, \lambda_{2324}, \lambda_{2425}$	Шліфування рейкошліфувальним поїздом рейок. Заміна рейок в першу чергу	$\mu_{21}, \mu_{22},$ μ_{23}, μ_{24} μ_{25}

Найменування інтенсивності відмов	Позначення	Найменування відповідної інтенсивності відновлення	Позначення
Зім'яття голівки рейки за дефектами 41, 43, 47.1. Зім'яття голівки через неоднорідність механічних властивостей металу в місці зварного стику (дефект 46.3)	$\lambda_{026}, \lambda_{2627}, \lambda_{2728}, \lambda_{2829}, \lambda_{031}, \lambda_{3132}, \lambda_{3233}, \lambda_{3334}$	Шліфування рейок повне і місцеве, планова заміна. Заміна в першу чергу	$\mu_{26}, \mu_{27}, \mu_{28}, \mu_{29}$
Корозія шийки, підшви рейки (59, 69) та інші дефекти (79, 99)	λ_{035}	Заміна рейок	μ_{35}

Для визначення ймовірностей знаходження рейок в кожному стані складено систему диференціальних рівнянь, на основі графа приведеного на рис. 1. Система приведена в матричному вигляді:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = A \cdot P, \quad (1)$$

де P – матриця ймовірностей знаходження рейок в i -тому стані:

$$P = \begin{pmatrix} P_0 \\ P_1 \\ \dots \\ P_{35} \end{pmatrix}; \quad (2)$$

A – матриця коефіцієнтів, які складаються з інтенсивностей відмов та інтенсивностей відновлення:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1,36} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2,36} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{36,1} & a_{36,2} & \dots & a_{36,36} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

де a_{mn} ($m = 1 \dots 36, n = 1 \dots 36$) – елементи матриці (табл. 2).

При цьому:

$$\sum_{i=0}^{35} P_i(t) = 1, \quad (4)$$

де $P_i(t)$ – ймовірності знаходження рейок в i -му стані; t – поточне значення пропущеного тоннажу.

Початкові умови в момент пропущеного тоннажу $t = 0$:

$$P_0(0) = 1, P_i(0) = 0, i = 1 \dots 35. \quad (5)$$

Таблиця 2

Значення елементів матриці A

Елемент матриці	Значення	Елемент матриці	Значення	Елемент матриці	Значення	Елемент матриці	Значення
a_{11}	$-(\lambda_{01} + \lambda_{05} + \lambda_{030} + \lambda_{06} + \lambda_{011} + \lambda_{015} + \lambda_{021} + \lambda_{026} + \lambda_{031} + \lambda_{035} + \lambda_{uu}) + \mu_{uu}$	$a_{1,10}$	μ_9	$a_{1,17}$	μ_{16}	$a_{1,23}$	μ_{22}
a_{15}	μ_4	$a_{1,11}$	μ_{10}	$a_{1,18}$	μ_{17}	$a_{1,24}$	μ_{23}
a_{16}	μ_5	$a_{1,13}$	μ_{12}	$a_{1,19}$	μ_{18}	$a_{1,25}$	μ_{24}
a_{17}	μ_6	$a_{1,14}$	μ_{13}	$a_{1,20}$	μ_{19}	$a_{1,26}$	μ_{25}
a_{18}	μ_7	$a_{1,15}$	μ_{14}	$a_{1,21}$	μ_{20}	$a_{1,27}$	μ_{26}

a_{19}	μ_8	$a_{1,16}$	μ_{15}	$a_{1,22}$	μ_{21}	$a_{1,28}$	μ_{27}
----------	---------	------------	------------	------------	------------	------------	------------

Закінчення табл. 2

Елемент матриці	Значення	Елемент матриці	Значення	Елемент матриці	Значення	Елемент матриці	Значення
$a_{1,29}$	μ_{28}	a_{99}	$-(\lambda_{89} + \mu_8)$	$a_{18,18}$	$-\mu_{17}$	$a_{28,28}$	$-(\lambda_{2728} + \mu_{27})$
$a_{1,30}$	μ_{29}	$a_{10,9}$	λ_{89}	$a_{19,1}$	λ_{018}	$a_{29,28}$	λ_{2728}
$a_{1,31}$	μ_{30}	$a_{10,10}$	$-(\lambda_{910} + \mu_9)$	$a_{19,19}$	$-(\lambda_{1819} + \mu_{18})$	$a_{29,29}$	$-(\lambda_{2829} + \mu_{28})$
$a_{1,36}$	μ_{35}	$a_{11,10}$	λ_{910}	$a_{20,19}$	λ_{1819}	$a_{30,29}$	λ_{2829}
a_{21}	λ_{01}	$a_{11,11}$	$-\mu_{10}$	$a_{20,20}$	$-(\lambda_{1920} + \mu_{19})$	$a_{30,30}$	$-\mu_{29}$
a_{22}	$-\lambda_{12}$	$a_{12,1}$	λ_{011}	$a_{21,20}$	λ_{1920}	$a_{31,1}$	λ_{030}
a_{32}	λ_{12}	$a_{12,12}$	$-(\lambda_{1112} + \mu_{11})$	$a_{21,21}$	$-\mu_{20}$	$a_{31,31}$	$-\mu_{30}$
a_{33}	$-\lambda_{23}$	$a_{13,12}$	λ_{1112}	$a_{22,1}$	λ_{021}	$a_{32,1}$	λ_{031}
a_{43}	λ_{23}	$a_{13,13}$	$-(\lambda_{1213} + \mu_{12})$	$a_{22,22}$	$-(\lambda_{2122} + \mu_{21})$	$a_{32,32}$	$-(\lambda_{3132} + \mu_{31})$
a_{44}	$-\lambda_{34}$	$a_{14,13}$	λ_{1213}	$a_{23,22}$	λ_{2122}	$a_{33,32}$	λ_{3132}
a_{54}	λ_{34}	$a_{14,14}$	$-(\lambda_{1314} + \mu_{13})$	$a_{23,23}$	$-(\lambda_{2223} + \mu_{22})$	$a_{33,33}$	$-(\lambda_{3233} + \mu_{32})$
a_{55}	$-(\lambda_{45} + \mu_4)$	$a_{15,14}$	λ_{1314}	$a_{24,23}$	λ_{2223}	$a_{34,33}$	λ_{3233}
a_{61}	λ_{05}	$a_{15,15}$	$-\mu_{14}$	$a_{24,24}$	$-(\lambda_{2324} + \mu_{23})$	$a_{34,34}$	$-(\lambda_{3334} + \mu_{33})$
a_{65}	λ_{45}	$a_{16,1}$	λ_{015}	$a_{25,24}$	λ_{2324}	$a_{35,34}$	λ_{3334}
a_{66}	$-\mu_5$	$a_{16,16}$	$-(\lambda_{1516} + \mu_{15})$	$a_{25,25}$	$-(\lambda_{2425} + \mu_{24})$	$a_{35,35}$	$-(\lambda_{3417} + \mu_{34})$
a_{71}	λ_{06}	$a_{17,1}$	λ_{016}	$a_{26,25}$	λ_{2425}	$a_{36,1}$	λ_{035}
a_{77}	$-(\lambda_{67} + \mu_6)$	$a_{17,16}$	λ_{1516}	$a_{26,26}$	$-\mu_{25}$	$a_{36,36}$	$-\mu_{35}$
a_{87}	λ_{67}	$a_{17,17}$	$-\mu_{16}$	$a_{27,1}$	λ_{026}	$a_{1,12}$	μ_{11}
a_{88}	$-(\lambda_{78} + \mu_7)$	$a_{18,1}$	λ_{017}	$a_{27,27}$	$-(\lambda_{2627} + \mu_{26})$		
a_{98}	λ_{78}	$a_{18,5}$	λ_{3417}	$a_{28,27}$	λ_{2627}		

Для кожного виду дефекту кількісною оцінкою надійності є функція інтенсивності відмов в залежності від пропущеного тоннажу, яка в загальному визначається за формулою:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}, \quad (6)$$

де $f(t)$ – функція щільності розподілу напруцювання до відмови;

$R(t)$ – функція ймовірності безвідмовної роботи.

Інтенсивність відмов залежить від фізики процесу. На основі попереднього аналізу пропонуємо такі види розподілу для кожного дефекту:

- експоненціальний закон розподілу характеризує раптові відмови системи чи об'єкта, інтенсивність відмов постійна (Д14, Д24, Д74, Д25, Д55, Д65, Д85);
- для дефектів контактної-втомленого походження функція інтенсивності відмов описується за нормальним законом (Д10,

Д11, Д17.1, Д17.2, Д18, Д20, Д21, Д27, Д28.1, Д21.1Н, Д30В, Д30Г, Д38.1, Д50, Д52, Д60, Д62, Д70, Д56.3, Д26.3, Д86.3, Д66.3, Д53.1, Д53.2);

- закон розподілу Вейбула – для опису поступових відмов зносного характеру (Д44, Д40, Д49, Д41, Д43, Д47.1, Д46.3, Д59, Д69, Д79, Д99.1, Д99.2, Д99.3).

Розроблена математична модель життєвого циклу рейок дозволяє з використанням необхідних експериментальних даних розв'язувати питання пов'язані із забезпеченням надійності роботи рейок і прогнозувати зміни надійності в залежності від пропущеного тоннажу, умов експлуатації, характеристик рухомого складу, та їх стану, напружено-деформованого стану рейок $[\sigma]$ та їх нормативних значень. На подальших етапах роботи планується визначити вплив перелічених показників на життєвий цикл рейок. Потрібно дослідити вплив допустимих напружень на інтенсивність відмов. Однією з цілей є встановлення інтегрованого показника взаємодії колії і рухомого складу, оскільки рівень взаємодії колії і рухомого складу оцінюється тільки за допустимими напруженнями. Встановити інтенсивності відмов рейок та інтенсивності їх відновлення, в залежності від інтегрованого показника.

Це дасть змогу розв'язати систему диференціальних рівнянь і визначити ймовірність знаходження рейок в кожному стані.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 27.003–83. Надежность в технике. Выбор и нормирование показателей надежности. Основные положения. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 17 с.

2. Крысанов Л. Г., Скворцов О. С., Филиппов В. М. Оценка усталостной долговечности рельсов // Вестник ВНИИЖТа, 1987 г. № 8, С. 44-46.

3. Тарнопольский Г. И. Расчеты усталостной долговечности конструкций (в частности железнодорожных рельсов) вероятностными методами. // Строительная механика. Труды НИИЖТа, вып. 62, Новосибирск, 1967.

4. Рыбкин В. В., Патласов А. М. Математическая модель отказов рельсов по усталостным дефектам // Вопросы взаимодействия пути и подвижного состава в условиях интенсификации работы железнодорожного транспорта. Сб.науч.тр.ДИИТА, вып. 278/31. Днепропетровск, 1990, 124 с.

5. Коган А. Я., Гаврилов В. М. Оценка одиночного удельного выхода рельсов по контактно-усталостным дефектам с использованием математической модели // Решение задач взаимодействия подвижного состава и пути реального очертания. / Под. ред А. Я. Когана: Сб.науч.тр., М.: Транспорт, 1985, 78 с.

6. Грищенко В. А. Оценка надежности рельсов бесстыкового пути участка железной дороги // Повышение надежности и эффективности железнодорожного пути / Под. ред. Н. И. Карпущенко. Межв. сб.науч.тр., Новосибирск, 1991, 122 с.

7. Надежность железнодорожного пути // В. С. Лысюк, В. Б. Каменский, Л. В. Башкатова; Под ред. В. С. Лысюка. – М.: Транспорт, 2001, 286 с.

8. Как повысить надежность пути . В. С. Лысюк, Г. Г. Желнин, В. В. Кузнецов // Путь и путевое хозяйство, № 4, 2002. – С. 8-15.

9. Класифікація і каталог дефектів і пошкоджень елементів стрілочних переводів та рейок залізниць України. – Д.: Арт-Прес, 2000. – 148 с.

10. Інструкція по устрою та утриманню колії залізниць України / Е. І.Даниленко, А. М. Орловський, А. П. Татуревич та інші. – К.: Транспорт України, 1999. – 248 с.