

## ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ РЕЛЬСОВ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Рейки – основной конструктивный элемент верхней будови залізничної колії, які безпосередньо сприймають динамічне навантаження від рухомого складу. В період їх експлуатації в рейковому металі відбуваються незворотні процеси, які знижують несучу спроможність.

При цьому несуча спроможність рейок забезпечується при умові, що діюче навантаження за весь період їх експлуатації не повинне перевищувати допустиме при заданій ймовірності.

В розробленій математичній моделі, яка ураховує випадковий процес навантаження рейок та несучої спроможності, а також нестационарний характер зменшення міцностних властивостей рейок, що дозволяє досліджувати увесь діапазон експлуатаційної роботи рейок в колії при заданих межах міцності.

Рельсы – основной конструктивный элемент верхнего строения железнодорожного пути, которые непосредственно воспринимают динамическую нагрузку от подвижного состава. В период их эксплуатации в рельсовом металле происходят необратимые процессы, снижающие их несущую способность.

При этом несущая способность рельсов обеспечивается при условии, что действующая нагрузка за весь период их эксплуатации не должна превышать допускаемые при заданной вероятности.

В разработанной математической модели, которая учитывает случайный процесс нагружения рельсов и несущей способности, а также нестационарный характер уменьшения прочностных свойств рельсов, что позволяет исследовать весь диапазон эксплуатационной работы рельсов в пути при заданных пределах прочности.

Rails – are the basic constructive element of the top structure of a railway which directly perceive dynamic loading from a rolling stock. During their operation in rail metal there are the irreversible processes lowering their carrying capacity.

Thus carrying capacity of rails is provided under the conditions that working loading for all period of their operation should not exceed admitted probabilities.

The developed mathematical model takes into account casual rails load process load rails and carrying capacity, and also non-stationary character of reduction strength properties of rails. It allows to investigate all range of operational work of rails in a track at the given strength.

Рельсы являются основными конструктивными и несущими элементами железнодорожного пути, которые непосредственно воспринимают динамическую нагрузку от колес подвижного состава. Кроме того, рельсы находятся в различных эксплуатационных условиях, которые образуют дополнительную группу факторов, усиливающих динамическое влияние. К числу таких факторов можно отнести: план и профиль пути; режимы ведения поезда; осевые нагрузки; скорости движения; вид обращаемого подвижного состава.

Существенное значение также имеют исходные прочностные характеристики рельсового металла, жесткость подрельсового основания, конструктивные особенности пути, что существенно отражается на условиях взаимодействия пути и подвижного состава. Все это приводит к необратимым процессам в структуре рельсового металла, способствуя развитию усталостных процессов и механическому износу, снижая, тем самым, несущую способность рельсов в пути.

Исходя из традиционной теоретической постановки вопроса, обычно [1, 2] использовалось требование, согласно которому действующие напряжения за весь период эксплуатации рельсов не должны превышать допускаемые. При этом условии разрушения не произойдет, если

$$\sigma_p + \lambda S \leq [\sigma], \quad (1)$$

где  $\sigma_p$  – действующие напряжения от подвижного состава;

$\lambda$  – нормирующий множитель, характеризующий заданный уровень вероятности;

$S$  – среднеквадратическое отклонение действующей нагрузки;

$[\sigma]$  – допускаемые напряжения.

Допускаемые напряжения, в свою очередь, определяются делением опасных напряжений, которые вызывают разрушение, на коэффициент запаса [3].

Данное неравенство обладает тем недостатком, что учитывает только вероятностный ха-

ракет внешнего воздействия на путь при постоянном допускаемом напряжении. Поскольку прочностные характеристики или несущая способность рельсов имеют случайный характер, обусловленный технологией их изготовления, в процессе эксплуатации несущая способность снижается и вероятность возникновения разрушения рельсов возрастает.

При совместном рассмотрении действующей нагрузки от подвижного состава и несущей способности для рельсов как случайных и независимых процессов, а также принимая во внимание нестационарность процесса несущей способности и стационарность нагружения, можно исследовать весь диапазон эксплуатационной работы рельсов в пути.

Из [4–6] известно, что решение подобной задачи в статистическом аспекте и оценка экспериментальной надежности предполагает два основных этапа.

*На первом* – методами строительной механики определяются условия, при которых изделие будет находиться в предельном состоянии. В зависимости от поставленной цели исследований, в качестве критериев могут быть приняты пределы упругости, текучести, прочности, контактной выносливости рельсовой стали и т. д.

*На втором* этапе производится расчет вероятности того, что предельное состояние не будет достигнуто за весь период эксплуатации.

Этот этап при внешнем дискретном нагружении выполняется методами теории вероятностей. Если процессы внешнего нагружения являются стационарными или нестационарными и непрерывными поведение системы и накопление повреждений также будет случайным процессом.

Для получения вероятностной оценки несущей способности будем рассматривать вероятность одновременного существования максимальных значений нагрузки  $Q$  и низких значений несущей способности  $R$ . Несущая способность рельсов по прочности и действующая нагрузка являются функциями случайных параметров  $r_i$  и  $q_i$ . Тогда условие выполнения несущей способности в общем виде, при котором отказ не произойдет будет иметь вид [4; 6; 7]:

$$R(r_1, \dots, r_n) - Q(q_1, \dots, q_n) = \Delta \geq 0. \quad (2)$$

Очевидно, что в начальный период времени эксплуатации рельсов условие прочности будет соблюдаться с вероятностью

$$P(R(r_1, \dots, r_n) - Q(q_1, \dots, q_n)) /_{t=0} = \Delta \geq 0,9973. \quad (3)$$

При дальнейшей эксплуатации рельсов в пути происходит снижение несущей способности, порядок изменения которой на сегодня неизвестен и является задачей дальнейших исследований.

Рассмотрим процессы с нормальным законом распределения нагрузки и несущей способности, хотя эти процессы могут иметь другой произвольный характер. В предполагаемой модели вводятся допущения, что действующая нагрузка в течение времени или по мере пропущенного по рельсам тоннажа имеет стационарный характер, а несущая способность [8], изменяется монотонно по экспоненциальному закону с функцией усталости:

$$e^{-\psi t}, \quad (4)$$

где  $\psi$  – коэффициент, характеризующий изменение физико-механических свойств и является величиной постоянной для рельсовой стали;  $t$  – пропущенный по рельсам тоннаж.

Значение случайной величины  $\Delta$  будет равно разности значений случайных величин  $R$  и  $Q$ , тогда вероятность превышения несущей способности возрастает, а условие прочности может быть представлено новой случайной величиной, имеющей свое математическое ожидание  $m_\Delta$

$$m_\Delta = R - Q, \quad (5)$$

а среднее квадратическое отклонение  $S_\Delta$  определяется, как

$$S_\Delta = \sqrt{S_R^2 + S_Q^2}, \quad (6)$$

где  $S_R$  – среднее квадратическое отклонение случайной величины  $R$ ;  $S_Q$  – среднее квадратическое отклонение случайной величины  $Q$ .

Если несущая способность и нагрузка подчиняются нормальному закону распределения, тогда новая случайная величина  $\Delta$  тоже будет подчиняться нормальному закону

$$f_\Delta = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot S_\Delta} \cdot e^{-\frac{(\Delta - m_\Delta)^2}{2S_\Delta^2}}. \quad (7)$$

Тогда условия работоспособности рельсов в пути будут выполнены, если  $\Delta \geq 0$ , а вероятность (4) может быть представлена, как

$$P_{\Delta} = \frac{C}{\sqrt{2\pi} \cdot S_{\Delta}^2} \cdot \int_0^{\infty} e^{-\frac{(\Delta-m_{\Delta})^2}{2S_{\Delta}^2}} d\Delta, \quad (8)$$

где  $C$  – нормирующий множитель, определяется из условия

$$C \int_0^{\infty} f_{\Delta}(\sigma) d\sigma = 1. \quad (9)$$

Учитывая, что интегрирование производится от 0, значением нормирующего множителя можно пренебречь. Тогда вероятность неразрушения в функциях Лапласа может быть выражена, как

$$P_{(\Delta \geq 0)} = 0,5 + \Phi\left(\frac{m_{\Delta}}{S_{\Delta}}\right), \quad (10)$$

где  $\Phi\left(\frac{m_{\Delta}}{S_{\Delta}}\right)$  – нормированная функция Лапласа.

Учитывая, что под воздействием подвижного состава характер изменения физико-механических свойств рельсовой стали связан с необратимыми процессами старения и накоп-

ления усталостных дефектов, изменения структуры решетки, то для таких процессов принимается экспоненциальный закон изменения несущей способности в зависимости от пропущенного тоннажа

$$R = R_0 \cdot e^{-\psi t}, \quad (11)$$

где  $R_0$  – исходное значение несущей способности рельсовой стали.

Согласно представленной расчетной схеме (рис. 1) при квазистационарном действии поездной нагрузки  $Q$  и нестационарном процессе изменения несущей способности, структура уравнения несущей способности в функции пропущенного тоннажа, будет иметь вид

$$R = \bar{R}_0 \cdot e^{-\psi t} - \lambda \cdot \sqrt{S_R^2 + S_Q^2}, \quad (12)$$

где  $\bar{R}_0$  – среднее значение прочностных характеристик рельсовой стали;  $\lambda$  – нормирующий множитель;  $t$  – пропущенный по рельсам тоннаж.

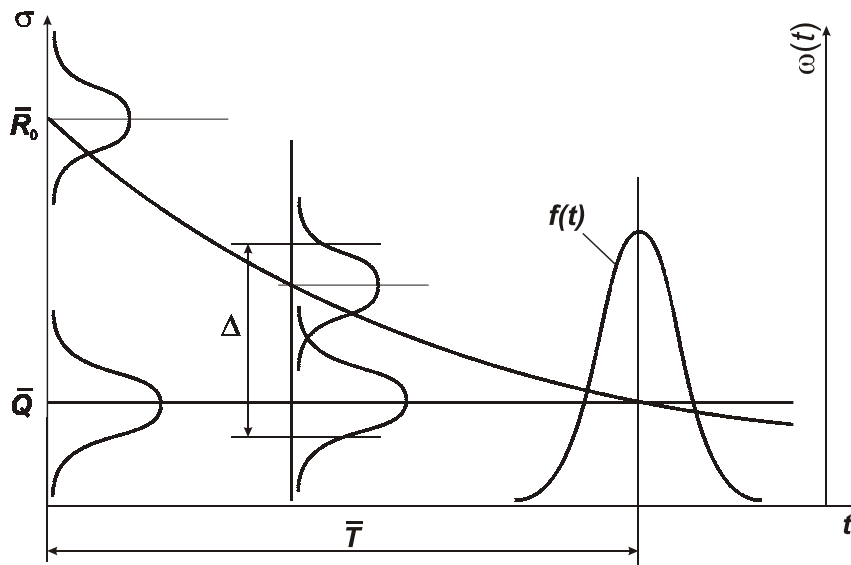


Рис. 1. Расчетная схема изменения несущей способности рельсов в процессе эксплуатации

Неизвестный коэффициент  $\psi$  функции усталости  $e^{-\psi t}$  можно определить из условия, что при  $\bar{T}$  несущая способность равна действующим нагрузкам. Тогда

$$\bar{R}_0 \cdot e^{-\psi \bar{T}} /_{t=\bar{T}} = \bar{Q} /_{t=\bar{T}}. \quad (13)$$

Логарифмируя выражение (13) определим  $\psi$

$$\psi = \frac{1}{\bar{T}} \cdot \ln \frac{\bar{R}_0}{\bar{Q}}. \quad (14)$$

При этом среднее значение пропущенного тоннажа для произвольного распределения выхода рельсов  $f(t)$  можно определить, как

$$\bar{T} = \int_{-\infty}^{+\infty} tf(t)dt. \quad (15)$$

Очевидно, что условие, при котором обеспечивается минимально допустимая несущая способность с предельной степенью вероятности не менее заданной можно найти через  $m_{\Delta}$  и среднеквадратическое отклонение.

Подставляя (15) в (12) окончательно будем иметь выражение для несущей способности во всем диапазоне эксплуатационной работы рельсов  $0 \dots T$ , величину которого с заданной вероятностью нельзя превышать

$$\min \Delta = \bar{R}_0 \exp \left( \frac{1}{\int_{-\infty}^{+\infty} tf(t)dt} \ln \frac{\bar{R}_0}{Q} \right) - \lambda \sqrt{S_R^2 + S_Q^2}. \quad (16)$$

Представленная математическая модель может быть использована при проведении дальнейших расчетов несущей способности рельсов по соответствующим заданным критериям прочности с учетом возможного накопления различного рода дефектов с вероятностной оценкой условия соблюдения прочности в эксплуатационных условиях железнодорожного пути.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шахунянц Г. М., Туровский И. Я., Смирнова М. Б. и др. Механические характеристики рельсов Р65 стандартного производства. Тр. МИИТа, вып. 271. – 1968. – С. 3–104.
2. Карпущенко Н. И. надежность связей рельсов с основанием. – М.: Транспорт, 1986. – 150 с.
3. Уманов М. И. К определению допустимых нарушений в рельсах на путях промышленного транспорта // Исследование расчетных характеристик и динамики железнодорожного пути. – Д., ДИИТ, 1985. – С. 81–85.
4. Николаенко Н. А. Вероятностные методы динамического расчета машиностроительных конструкций М.: Машиностроение, 1967. – 368 с.
5. Надежность и эффективность в технике, под ред. Кузнецова В. А., М.: Машиностроение, 1990. – 330 с.
6. Серенсен С. В. Прочность элементов конструкций в статистическом аспекте и оценки их экспериментальной надежности // Надежность и долговечность машин и оборудования. – М.: Издательство стандартов, 1972. – С. 136–146.
7. Соломаха В. А., Перлик В. И., Никозаков Д. Д. Учет особенностей формирования качества элементов систем при совместном рассмотрении ее взаимодействия с внешними нагрузками // Надежность сложных технологических систем. Научная думка, 1974. – С. 106–112.
8. Ангелейко В. И., Брадул-Кириллов Б., Возненко И. Я. О выборе допустимых напряжений в элементах верхнего строения пути. Межвузовский сб. научн. тр. / Харьковский институт инженеров железнодорожного транспорта. – Х., 1986. – С. 86–95.