



К вопросу определения относительной контактно-усталостной повреждаемости поверхности катания рельсов



Валерий КОССОВ



Александр САВИН



Олег КРАСНОВ

Коссов Валерий Семёнович – Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава, Коломна, Россия.

Савин Александр Владимирович – Российский университет транспорта, Москва, Россия.

Краснов Олег Геннадьевич – Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава, Коломна, Россия.*

В связи с внедрением на многих железных дорогах, в том числе и российских, тяжеловесного движения остро встал вопрос оценки влияния повышенных осевых нагрузок на контактно-усталостную долговечность рельсов.

Для создания научно обоснованного метода прогнозирования контактно-усталостной долговечности рельсов в зависимости от величин осевых нагрузок проведён комплекс теоретических исследований, описание которого приведено в настоящей статье. На конечно-элементной модели прокатывания колеса по рельсу определено напряжённо-деформированное состояние зоны контакта. Установлено, что зона контакта при прокатывании колеса по рельсу испытывает сложное многоосное нагружение с одновременным действием нормальных и сдвиговых деформаций. На основании анализа моделей, описывающих многоосное усталостное повреждение, выбрана модель Брауна–Миллера, в которой учитывается одновременное действие нормальных деформаций на площадке контакта и максимальных сдвиговых деформаций, что наиболее полно описывает напряжённо-деформированное состояние зоны контакта при прокатывании колеса по рельсу. Для применения модели Брауна–Миллера установлены деформационные кривые усталости для рельсовой стали. По результатам анализа методов определения параметров деформационных

кривых, выполненного В. А. Троценко, был применён модифицированный метод твёрдости Расла–Фатеми. На основании экспериментально определённых значений твёрдости на поверхности катания расчётно-экспериментальным путём выявлены параметры кривых упругой и пластической усталости. Для установления повреждающего действия нагрузки от прокатывания колеса по рельсу принято понятие относительного повреждения за цикл прокатки – величины, обратной числу циклов до образования контактно-усталостной трещины при заданной величине осевой нагрузки.

При принятии усреднённых характеристик показателей степени усталостной прочности и пластичности рельсовой стали и расчётных напряжений в зоне контакта «колесо–рельс» с учётом пластической коррекции по Нейберу в программном комплексе *Fatigue* проведены расчёты относительной повреждаемости поверхности катания рельсов контактно-усталостными дефектами. Получена полиномиальная зависимость относительной повреждаемости поверхности катания рельсов. Установленная функциональная зависимость относительной повреждаемости поверхности катания рельсов от величин вертикальных сил является основой для разработки методики прогнозирования контактно-усталостной долговечности рельсов.

Ключевые слова: железная дорога, напряжённо-деформированное состояние, зона контакта колеса с рельсом, контактно-усталостная долговечность, многоосная усталость, параметры упругой и пластической усталости, относительная повреждаемость.

*Информация об авторах:

Коссов Валерий Семёнович – доктор технических наук, профессор, генеральный директор акционерного общества «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), Коломна, Россия, info@vnikti.com.

Савин Александр Владимирович – доктор технических наук, доцент, проректор Российского университета транспорта, Москва, Россия, a.v.savin@miit.ru.

Краснов Олег Геннадьевич – кандидат технических наук, заведующий отделом пути и специального подвижного состава АО «ВНИКТИ» (АО «ВНИКТИ»), Коломна, Россия, krasnov-og@vnikti.com.

Статья поступила в редакцию 12.01.2021, принята к публикации 26.02.2021.

For the English text of the article please see p. 12.

Внедрение тяжеловесного движения делает актуальным вопрос оценки влияния повышенных осевых нагрузок на контактно-усталостную долговечность рельсов. Целью исследования является создание научно обоснованного метода прогнозирования контактно-усталостной долговечности рельсов в зависимости от величин осевых нагрузок.

Характерной особенностью поверхности катания головки рельса является работа в упругопластической зоне, о чём свидетельствуют образование наклёпанного слоя на поверхности катания и расплющивание головки рельсов на внутренних нитках в кривых участках пути и в зонах сварных стыков [1–5]. Путём моделирования процесса прокатки колеса по поверхности рельса на конечно-элементной модели установлено, что компоненты тензора напряжений на поверхности рельса находятся в непропорциональном многоосном напряжённом состоянии, для описания которого, а также с целью прогнозирования разрушения необходимо использовать теорию многоосной усталости [6–9]. Накопление усталостных повреждений материала головки рельса происходит в результате многократно повторяющихся нагружений, вызываемых катящимся колесом.

Другая особенность контакта катящегося колеса по рельсу определяет необходимость сгущать сетку конечно-элементной модели, применяемой для расчёта напряжённо-деформированного состояния (НДС) [9]. В этом случае для установления контактно-усталостной повреждаемости принято использовать деформационный подход. Известно несколько деформационных моделей усталостного разрушения, которые обобщают классическое соотношение Коффина–Мэнсона. Для многоосного усталостного разрушения используются модели Брауна–Миллера, Фатемии–Соси и Смита–Ватсона–Топпера [10–13].

Механизмы разрушения, соответствующие этим моделям [14], представлены на рис. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По результатам сравнения механизмов разрушения, соответствующих вышеперечисленным моделям, с учётом характерной особенности работы поверхности головки рельса в упругопластической зоне при многоосном циклическом нагружении, включающем деформации растяжения-сжатия, нормальные к площадке максимальных сдвиговых деформаций в зоне контакта колеса с рельсом, для расчёта контактно-усталостной долговечности рельсов выбрана модель Брауна–Миллера [11].

В ней случай многоосного усталостного разрушения описывается уравнением:

$$\varepsilon_a \cong \frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} + \alpha_{bm} \Delta\varepsilon_{\perp} = \beta_1 \frac{\sigma'_f - 2\sigma_{\perp mean}}{E} (2N_p)^b + \beta_2 \varepsilon'_f (2N_p)^c, \quad (1)$$

где ε_a — амплитуда полной деформации;

$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2}$ — амплитуда максимальных сдви-

говых деформаций, достигаемых на некоторой площадке в зоне контакта;

$\alpha_{bm}, \beta_1, \beta_2$ — коэффициенты, равные:

$\alpha_{bm} = 0,3; \beta_1 = (1 + \nu) + (1 - \nu) \alpha_{bm};$

$\beta_2 = 1,5 + 0,5 \alpha_{bm},$

где ν — коэффициент Пуассона;

$\Delta\varepsilon_{\perp}$ — размах нормальных деформаций на этой площадке;

$\sigma'_f, \varepsilon'_f$ — коэффициенты упругой и пластической усталостной прочности;

$\sigma_{\perp mean}$ — среднее за цикл нормальное напряжение на этой площадке;

E — модуль Юнга для рельсовой стали;

N_p — число циклов до разрушения;

b — экспонента усталостной прочности (Басквина);

c — экспонента усталостной пластичности (Коффина–Мэнсона).

Деформационные подходы, основанные на учёте как упругой, так и пластической со-

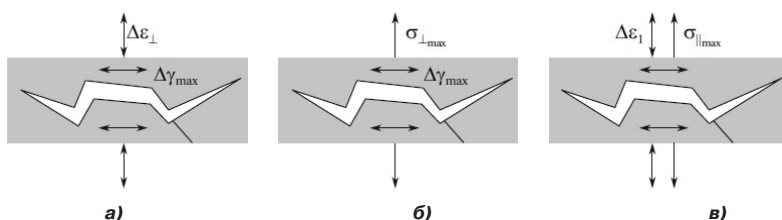


Рис. 1. Механизмы разрушения, соответствующие моделям Брауна–Миллера (а), Фатемии–Соси (б), Смита–Ватсона–Топпера (в) [14].





ставляющей деформации, подходят для исследования усталости материала на поверхности катания рельсов. При этом процесс взаимодействия колеса с рельсом условно может быть разделён на две составляющие. Для начального периода характерно пластическое течение металла, приводящее его к зоне приспособляемости. После достижения зоны приспособляемости пластическое деформирование практически прекращается, и материал работает в упругой зоне.

Относительная повреждаемость головки рельса определялась на основе расчётных компонент тензора напряжений, модели Брауна—Миллера и многоосной пластической коррекции по Нейберу на циклическую диаграмму деформирования [15]. Расчёты проводились при вероятности разрушения 95 %.

С целью определения контактно-усталостной повреждаемости для случая упругопластического деформирования предложено использовать деформационный подход. Деформационная кривая усталости представляет собой зависимость амплитуды полной деформации от числа полуциклов до разрушения. Зависимость амплитуды деформации от числа циклов до зарождения усталостной трещины (усталостного разрушения) имеет вид [10]:

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} (N_p)^b + \varepsilon'_f (N_p)^c. \quad (2)$$

Уравнение (2) получило название уравнения Басквина—Коффина—Мэнсона [15].

В выражении (2) при циклическом нагружении амплитуда полной деформации ε_a может быть представлена как сумма амплитуд упругой (ε_{ae}) и пластической (ε_{ap}) составляющих деформации:

$$\varepsilon_{ae} = \frac{\sigma'_f}{E} (N_p)^b; \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ap} = \varepsilon'_f (N_p)^c. \quad (4)$$

Важной характеристикой свойств материала при циклическом нагружении является кривая циклического деформирования, описывающая зависимость амплитуды напряжения от амплитуды деформации при циклическом нагружении, так называемая диаграмма Рамберга—Осгуда [17]:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{ae} + \varepsilon_{ap} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'} \right)^{1/n'}, \quad (5)$$

где K' — коэффициент циклической прочности;

n' — коэффициент циклического деформационного упрочнения.

Как показывают данные источников [16; 17], между параметрами уравнений (3)—(5) имеют место следующие зависимости, которые, несмотря на хорошее качественное соответствие с экспериментальными результатами, могут найти практическое использование только в случае правильного выбора входящих в них параметров:

$$\sigma'_f = K'(\varepsilon'_f)^{n'}; \quad (6)$$

$$n' = b/c. \quad (7)$$

Эмпирические параметры σ'_f , ε'_f , b , c в уравнении (1) являются основой для построения кривых упругой и пластической усталости в координатах $\lg \varepsilon_a - \lg N_p$ и могут быть найдены с использованием характеристик механических свойств металлов и сплавов. При этом важно установить корреляционную зависимость между указанными параметрами и характеристиками прочности и пластичности рельсовой стали при циклическом нагружении.

В литературе предложено много различных методов оценки параметров уравнения Басквина—Коффина—Мэнсона (2) [17; 18]. В работе В. А. Трощенко [18] проанализированы методы определения оценочных значений параметров σ'_f , ε'_f , b , c уравнения Басквина—Коффина—Мэнсона и для сталей рекомендовано использовать модифицированный метод твёрдости Расла—Фатемии. Определим величины коэффициентов усталостной пластичности ε'_f и упругой усталости σ'_f [18]:

$$\sigma'_f = 4,5HB + 225; \quad (8)$$

$$\varepsilon'_f = (0,32HB^2 - 487HB + 191000)/E, \quad (9)$$

где HB — твёрдость рельсов на поверхности катания.

На площадке АО «ВНИКТИ» экспериментально определена твёрдость темплетов рельсов ДТ350 производства ЗАО «ЗСМК» и ПАО «ЧМК», объёмно-закалённых рельсов Т1 производства ЗАО «ЗСМК» [19] в соответствии с ГОСТ Р 51685-2013¹ (рис. 2).

Результаты измерения твёрдости объёмно-закалённых рельсов Т1, дифферен-

¹ ГОСТ Р 51685-2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия. — М.: Стандартинформ, 2014. — 121 с.

цированно-термоупрочнённых рельсов ДТ350 представлены в табл. 1.

По данным о твёрдости рельсовых сталей, полученным специалистами АО «ВНИКТИ» (табл. 1), рассчитаны значения параметров σ'_p , ϵ'_p , b , c с использованием уравнения Басквина—Коффина—Мэнсона.

В модифицированном методе твёрдости Расла—Фатеми [18] коэффициенты наклона деформационных кривых усталости b и c считаются постоянными, и для сталей рекомендованы значения $b = -0,09$, $c = -0,56$.

Величины упругой ϵ_{ac} , пластической ϵ_{ap} , а также суммарной ϵ_a деформаций рассчитаны от количества циклов до разрушения N_p при циклическом нагружении.

Амплитуда упругой деформации ϵ_{ac} от числа циклов до разрушения определялась согласно выражению (3), амплитуда пластической деформации ϵ_{ap} от числа циклов — в соответствии с выражением (4).

Суммарная деформация от числа циклов до зарождения усталостной трещины определялась как сумма упругой и пластической деформаций. Результаты расчёта упругой, пластической и суммарной де-



Рис. 2. Темплет рельса с вмятинами от шарика по методу Бринелля для определения твёрдости по поперечному сечению рельса [19].

формаций от числа циклов N_p представлены в табл. 2.

Для удобства представления деформационных кривых усталости для рельсовых сталей расчётные данные ϵ_{ap} , ϵ_{ac} , ϵ_a для разных N_p пересчитаны для системы координат $\lg \epsilon_a - \lg N_p$. Результаты расчёта представлены в табл. 3.

На рис. 3 в логарифмических координатах схематически представлены деформационные кривые усталости в соответствии с выражениями (2)—(4). Эмпирические параметры σ'_p , ϵ'_p , b , c в уравнении (2), которые являются основой для построения

Таблица 1
Результаты измерения твёрдости объёмно-закалённых рельсов Т1 и дифференцированно-термоупрочнённых рельсов ДТ350 (составлено авторами)

Элемент	Категория рельса		
	Т1	ДТ350 (ПАО «ЧМК»)	ДТ350 (АО «Евраз ЗСМК»)
Головка рельса	363; 363; 363; 363; 363; 363; 363; 352; 352; 352; 352; 363; 363; 363; 363; 341; 341; 363; 363; 363; 363; 363	363; 363; 363; 363; 363; 363; 363; 352; 352; 352; 352; 363; 363; 352; 352; 341; 341; 352; 352; 341; 341; 341	373; 371; 369; 369; 359; 369; 363; 362; 363; 353; 353; 353; 352; 352; 362; 347; 345; 348; 341; 341; 342
Шейка рельса	352; 341	302; 302	307; 362
Подошва рельса	341; 341; 341	302; 302; 302	306; 306; 306

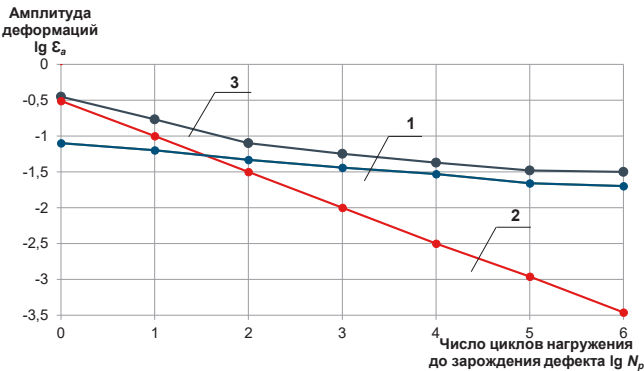


Рис. 3. Деформационные кривые усталости для рельсовой стали: 1 – деформационная кривая упругой усталости; 2 – деформационная кривая пластической усталости; 3 – деформационная суммарная кривая усталости (выполнено авторами).



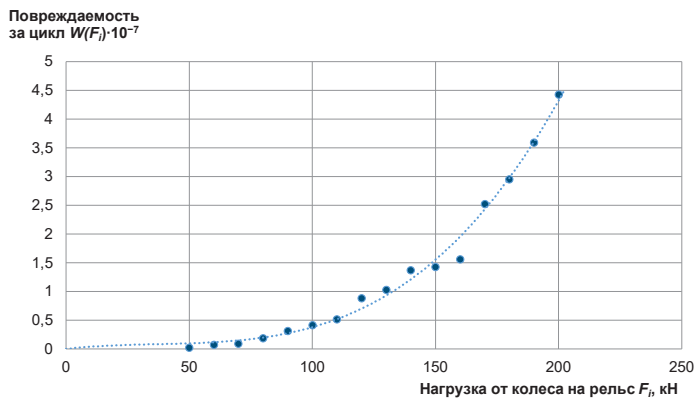


Рис. 4. Относительная повреждаемость за один цикл проката колеса над исследуемой зоной при разных нагрузках от колеса (выполнено авторами).

Таблица 2
Расчётные значения упругих, пластических и суммарных деформаций кривых для рельсовой стали (HB = 360) (составлено авторами)

№ п/п	N_p	$\varepsilon_{ac} = \frac{\sigma_L}{E} (N_p)^b$	$\varepsilon_{ap} = \varepsilon'_p (N_p)^c$	$\varepsilon_a = \varepsilon_{ac} + \varepsilon_{ap}$
1	0	0,083600	0,272000	0,355600
2	10	0,068000	0,075000	0,143000
3	10^2	0,059000	0,020600	0,079600
4	10^3	0,048000	0,005600	0,053600
5	10^4	0,039000	0,001560	0,040560
6	10^5	0,032000	0,000430	0,032430
7	10^6	0,026000	0,000118	0,026118
8	10^7	0,020000	0,000033	0,020033
9	10^8	0,016000	0,000009	0,016009

Таблица 3
Значения параметров деформационных кривых усталости рельсовой стали HB = 360 в логарифмических координатах $\lg \varepsilon_a - \lg N_p$ (составлено авторами)

№ п/п	$\lg N_p$	$\lg \varepsilon_{ac}$	$\lg \varepsilon_{ap}$	$\lg \varepsilon_a$
1	0	-1,0700	-0,5650	-0,4490
2	1	-1,1600	-1,1250	-0,8400
3	2	-1,2300	-1,6860	-1,0240
4	3	-1,3700	-2,2500	-1,2680
5	4	-1,4100	-2,8100	-1,3979
6	5	-1,4900	-3,3700	-1,4890
7	6	-1,5800	-3,9300	-1,5830
8	7	-1,7000	-4,4300	-1,6980
9	8	-1,7900	-5,0400	-1,7950

кривых усталости в координатах $\lg \varepsilon_a - \lg N_p$, найдены с использованием характеристик механических свойств рельсовой стали. В зависимости от технологии изготовления

и обработки рельса эти параметры могут отличаться от полученных.

Для определения повреждающего действия нагрузки от прокатывания колеса по рельсу принято понятие относительного повреждения за цикл прокатки. Относительная повреждаемость — величина, обратная числу циклов до образования контактно-усталостной трещины при заданной величине осевой нагрузки. Максимальные относительные повреждения в рельсе при разных значениях вертикальной нагрузки на колесо показаны на рис. 4.

Выполненная аппроксимация точек относительной повреждаемости рельсов при прокатывании колеса с разной величиной нагрузки позволила получить теоретическую зависимость от вертикальной силы в виде полинома:

$$W(F_i) = 9,15 \cdot 10^{-7} F_i^3 - 7,65 \cdot 10^{-5} F_i^2 + 0,00289 F_i, \quad (10)$$

где F_i — вертикальная сила, действующая на рельс от прокатки вагонного колеса при разной колёсной нагрузке, кН.

Полученные результаты относительной повреждаемости при прокатывании колеса по поверхности катания рельса в зависимости от величин вертикальных сил являлись основой для проведения расчётов по контактно-усталостной долговечности рельсов.

Выводы

1. С учётом характерной особенности работы поверхности катания рельса в упругопластической зоне при многоосном циклическом нагружении для расчёта контактно-усталостной долговечности рельсов выбрана модель усталостного разрушения Брауна—Миллера.

2. Проведён расчёт параметров деформационных кривых усталости для рельсовых сталей с применением модифицированного метода твёрдости Расла–Фатемиде. Определены эмпирические параметры кривых упругой пластической усталости: $\sigma'_f = 1845$, $\epsilon'_f = 0,272$, $b = -0,09$, $c = -0,56$.

3. Построены кривые упругой, пластической и суммарной усталости для рельсовой стали от числа циклов до разрушения. При принятии усреднённых характеристик показателей степени усталостной прочности и пластичности рельсовой стали и расчётных напряжений в зоне контакта «колесо–рельс» с учётом пластической коррекции по Нейберу в программном комплексе Fatigue проведены расчёты относительной повреждаемости поверхности катания рельсов контактно-усталостными дефектами. Получена полиномиальная зависимость относительной повреждаемости поверхности катания рельсов. Установленная функциональная зависимость относительной повреждаемости поверхности катания рельсов от величин вертикальных сил является основой для проведения расчётов по контактно-усталостной долговечности рельсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Громов В. Е., Иванов Ю. Ф., Морозов К. В., Перегудов О. А., Попова Н. А., Никоненко Е. Л. Механизмы упрочнения рельсов при длительной эксплуатации // Проблемы чёрной металлургии и материаловедения. – 2015. – № 4. – С. 98–104. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25017048>. Доступ 12.01.2021.
2. Громов В. Е., Иванов Ю. Ф., Морозов К. В., Перегудов О. А., Алсараева К. В., Попова Н. А., Никоненко Е. Л. Изменение структуры и свойств поверхностных слоёв головки рельсов после длительной эксплуатации // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2015. – Т. 12. – № 2. – С. 203–208. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23613452>. Доступ 12.01.2021.
3. Добужская А. Б., Галицын Г. А., Сырейщикова В. И. Исследование структуры рельсов с разной стойкостью к образованию контактно-усталостных дефектов // Влияние свойств металлической матрицы на эксплуатационную стойкость рельсов: Сб. науч. тр. ОАО «УИМ». – Екатеринбург. – 2006. – С. 64–81.
4. Марков Д. П. Контактная усталость колёс и рельсов // Вестник ВНИИЖТ. – 2001. – № 6. – С. 8–14.
5. Ахметзянов М. Х. О механизме развития контактно-усталостных повреждений в рельсах // Вестник ВНИИЖТ. – 2003. – № 2. – С. 41–45.
6. Коссов В. С., Краснов О. Г., Акашев М. Г. Влияние смятия в зоне сварных стыков на силовое воз-

действие подвижного состава на путь // Вестник ВНИИЖТ. – 2020. – Т. 79. – № 1. – С. 35–43. [Электронный ресурс]: <https://www.journal-vniizht.ru/jour/article/download/382/293>. Доступ 12.01.2021.

7. Коссов В. С., Волохов Г. М., Краснов О. Г., Овечников М. Н., Протопопов А. Л., Огуенко В. В. Влияние величины осевых нагрузок на контактно-усталостную прочность рельсов // Вестник ВНИИЖТ. – 2018. – Т. 77. – № 3. – С. 149–156. [Электронный ресурс]: <https://www.journal-vniizht.ru/jour/article/view/182>. Доступ 12.01.2021.

8. Meggiolaro, M. A., Pinho de Castro, J. T., Hao Wu. Invariant-based and Critical-plane Rainflow Approaches for Fatigue Life Prediction Under Multiaxial Variable Amplitude Loading. 3rd International Conference on Material and Component Performance under Variable Amplitude Loading (VAL 2015), Prague, March 23–26, 2015. Procedia Engineering, Vol. 101, pp. 69–76.

9. Сакало А. В. Математическое моделирование контактных напряжений фрагментов на упругом основании с использованием конечно-элементных моделей // Дис... на соиск. уч. степ. канд. техн. наук / Брянский государственный технический университет. – Брянск, 2009. – 143 с.

10. Manson, S. S. Fatigue: A complex subject – some simple approximation. Experimental Mechanics, 1965, Vol. 5, pp. 193–226.

11. Brown, M., Miller, K. J. Theory for fatigue under multiaxial stress-strain conditions. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1973, Vol. 187, Iss. 65, pp. 745–756.

12. Shamsaei, N., Fatemi, A., Socie, D. F. Multiaxial fatigue evaluation using discriminating strain paths. International Journal of Fatigue, 2011, Vol. 33, Iss. 4, pp. 597–609. DOI:10.1016/j.ijfatigue.2010.11.002.

13. Smith, R. N., Watson, P., Topper, T. H. A stress-strain parameter for the fatigue of metals. Journal of Materials Science, 1970, Vol. 5, No. 4, pp. 767–778.

14. Горохов В. А. Численное моделирование упругопластического моделирования конструкций из нержавеющей сталей и графитов при квазистатическом терморadiационном нагружении // Дис... канд. физ.-мат. наук. – Нижний Новгород, 2007. – 113 с. [Электронный ресурс]: <http://www.unn.ru/pages/dissert/209.pdf>. Доступ 12.01.2021.

15. Коссов В. С., Краснов О. Г., Огуенко В. Н. Повышение надёжности рельсов при эксплуатации в условиях низких температур // Труды XVI междунар. науч.-техн. конф. (чтений памяти проф. Г. М. Шахунянца) «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути». Секция 2. Железнодорожный путь для высокоскоростного движения и высоких осевых нагрузок. – М., 2019. – С. 82–87.

16. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказания, предотвращения / Пер. с англ. – Мир, 1984. – 624 с.

17. Ramberg, W., Osgood, W. R. Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters. National Advisory Committee for Aeronautics, Technical Note No. 902, 1943. [Электронный ресурс]: <http://www.apesolutions.com/spd/public/NACA-TN902.pdf>. Доступ 12.01.2021.

18. Бурого Н. Г., Журавлев А. Б., Никитин И. С. Модели многоосного усталостного разрушения и оценка долговечности элементов конструкций // Известия РАН. Механика твёрдого тела. – 2011. – № 6. – С. 22–33. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17232791>. Доступ 12.01.2021.

19. Трошенко В. Т., Хамаза Л. А. Деформационные кривые усталости сталей и методы определения их параметров // Проблемы прочности. – 2010. – № 6. – С. 26–39.

