УДК 539.4

© В. И. Смирнов, д-р техн. наук, профессор

© С. С. Майер, ассистент

(Петербургский государственный университет путей
сообщения, Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: vsmirnov1@gmail.com, sergzo@bk.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-2-68-74

© V. I. Smirnov, Dr. Sci. Tech., Professor

© S. S. Maier, assistant lecturer

(Emperor Alexander I St. Petersburg State
Transport University, St. Petersburg, Russia)

E-mail: vsmirnov1@gmail.com, sergzo@bk.ru

МНОГОЦИКЛОВАЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ БАЛКИ С ВНУТРЕННЕЙ ТРЕЩИНОЙ В ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ

MULTI-CYCLE CRACK RESISTANCE OF THE BEAM WITH INTERNAL CRACK IN OPERATING CONDITIONS

В работе изучается влияние некоторых эксплуатационных факторов на циклическую трещиностойкость балки с внутренней поперечной трещиной кругового очертания. Балка в форме неравнополочного двутавра расположена на сплошном упругом основании и подвергается многократному нагружению сосредоточенной силой. Установлена зависимость числа циклов нагружения, необходимого для роста дефекта до заданного размера, от температуры. На основе принципа независимости действия сил оценивается остаточный ресурс балки в случае действия произвольной системы сил. Предложенная расчетная схема применяется для оценки долговечности железнодорожных рельсов.

Ключевые слова: циклическая трещиностойкость, круговая трещина, усталостное разрушение, изгиб балки, рельс.

The paper examines the effect of some operational factors on the cyclical crack resistance of the beam with an inner transverse crack of the circular shape. The beam with the cross-section of an uneven I-beam joist is positioned on a solid elastic foundation and is subjected to repeated loading by concentrated force. The temperature dependence of the number of loading cycles required for the defect to grow to a given size is established. In addition, on the basis of the principle of the independence of the forces, the residual resource of the beam is assessed in the case of an arbitrary system of forces. The proposed calculation scheme is used to assess the durability of rails.

Keywords: cyclical crack resistance, circular crack, fatigue fracture, beam bending, rail.

Опыт эксплуатации показывает, что разрушение рельсов часто происходит по причине контактно-усталостных дефектов, и во многих случаях это ведет к возникновению аварийных ситуаций. Наиболее опасными из таких контактно-усталостных дефектов являются внутренние поперечные трещины (ВПТ). Эти трещины склонны распространяться вглубь металла, и их интенсивное развитие может привести к утрате рельсом несущей способности. Поэтому долговечность рельса (способность выполнять свои функции в поврежденном состоянии) обычно связывают с продолжительностью «жиз-

ни» ВПТ. Параметром, характеризующим долговечность («живучесть»), служит количество циклов нагружения (проходов колеса подвижного состава), которое вызывает рост трещины от начального до критического размера.

Рельс рассматривается как балка бесконечной длины, лежащая на сплошном упругом основании [1]. Поперечное сечение балки — неравнополочный двутавр, в верхней полке (головке рельса) которого расположена ВПТ круговой формы. Трещина подвергается циклическим растягивающим напряжениям от обратного изгиба, вызванного сосредоточенной силой (колес-

ной нагрузкой). Трещина расположена в опасном сечении, в котором нормальные растягивающие напряжения достигают максимума, а поперечная сила равна нулю, то есть условия нагружения соответствует чистому изгибу. Однако процесс циклического нагружения сопровождается воздействием дополнительных силовых факторов, влияющих на величину нормальных напряжений, — температурных и остаточных напряжений, пригрузки от соседних колес, напряжений сдвига и кручения и т. п. Здесь рассмотрим влияние на долговечность температурных и остаточных напряжений и взаимовлияние близко расположенных колесных пар подвижного состава.

В работе [2] было предложена формула для оценки количества допустимых циклов нагружения

$$N = -\frac{1}{d} \int_{a_n}^{a_k} \frac{da}{(K_{I \max}/K_{Ic})^2 + \ln(1 - (K_{I \max}/K_{Ic})^2)}, \quad (1)$$

которая является следствием из уравнения скорости роста усталостных трещин, полученного Г. П. Черепановым [3].

В равенстве (1) приняты следующие обозначения: a_n , a_k — начальный и конечный радиус трещины; K_I — коэффициент интенсивности напряжений (КИН); $K_{I \max}$ — максимальное значение КИН в цикле; K_{Ic} — вязкость разрушения (критический КИН); d — структурный параметр размерности длины, $d = 2K_{Ic}^2 / (\pi\sigma_c^2)$ [4], σ_c — предел прочности при растяжении.

Расчетное значение КИН принято для трещины круговой формы радиуса a , подверженной равномерному растяжению в упругом пространстве. Влияние границ тела учитывается введением поправочного множителя [5].

Температурные и остаточные напряжения

Температурные напряжения (в большей степени присущие бесстыковому пути) относительно достоверно можно оценить только для конкретных условий эксплуатации рельсошпальной решетки. В общем случае продольное напряжение, вызванное нагревом/охлаждением, определяют, рассматривая рельс как стержень, по формуле

$$\sigma_T = E\alpha\Delta T,$$

где E — модуль упругости; α — коэффициент линейного расширения; ΔT — изменение температуры, $\Delta T = T_N - T$, T — температура окружающей

среды, T_N — нейтральная температура (температура, при которой рельс уложен и закреплен в стыках и в нем отсутствуют термически обусловленные продольные напряжения). Для рельсовой стали $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, $\alpha = 11,8 \cdot 10^{-6}$ 1/°С. Тогда

$$\sigma_T \approx 2,5\Delta T, \text{ МПа.} \quad (2)$$

Из (2) следует, что перепад температуры в 1 °С вызывает изменение продольных нормальных напряжений (летом — сжимающих, зимой — растягивающих) на 2,5 МПа для рельса любого типа и длины.

Остаточные напряжения, обусловленные как технологической правкой, так и воздействием колес, в произвольном сечении распределены по высоте головки рельса весьма неравномерно и могут быть как растягивающими, так и сжимающими [6–13]. Количественные оценки продольных остаточных напряжений, известные в литературе, имеют сильный разброс, — от 69–103 МПа на уклонах до 207–276 МПа в кривых участках пути, а максимум наблюдается на поверхности катания и может достигать 1/3 от предела текучести рельсовой стали [7]. Известные экспериментальные методы определения остаточных напряжений (например, рентген или установка тензодатчиков на сечение рельса) не отличаются высокой точностью, тем более что изъятие рельса из пути и/или его разрезка на образцы приводят к релаксации напряжений.

Для практических расчетов удобна эмпирическая формула оценки продольных остаточных напряжений в зависимости от соотношения площадей внутренней поперечной трещины S и головки рельса S_r [14]:

$$\sigma_R = 69,85 - 87,31 \frac{S}{S_r}, \text{ МПа.}$$

Суммарное растягивающее напряжение в головке рельса, таким образом, будет равно

$$\sigma = \sigma_W + \sigma_T + \sigma_R,$$

где σ_W — напряжение в опасном (максимальном) сечении от изгибающего момента, вызванного сосредоточенной силой (колесной нагрузкой).

В силу линейной упругости вклад температурных и остаточных напряжений $\Delta\sigma = \sigma_T + \sigma_R$ в суммарное продольное напряжение равносильно соответствующему увеличению сосредоточенной силы P . Так, для рельса типа Р65 возрастание продольного напряжения на 1 МПа (в опасном сечении, при $M = M_{\max}$) вызывается

увеличением силы в $1,114 \cdot 10^{-5}$ кН, что следует из связи изгибающего момента с нагрузкой P :

$$P = \sigma \frac{4kIe^{\pi/2}}{H},$$

где σ — нормальное напряжение от изгибающего момента; k — коэффициент относительной жесткости основания; I — момент инерции поперечного сечения; H — расстояние от центра трещины до нейтральной оси.

Увеличению напряжения $\Delta\sigma = 400$ МПа ($\sigma_T = 150$ МПа при $\Delta T = 60$ °С, $\sigma_R = 250$ МПа [15]) соответствует прирост силы $\Delta P = 4,456 \cdot 10^{-3}$ кН, что никак не сказывается на долговечности рельса. Прирост нагрузки $\Delta P = 1$ кН (при $K_{Ic} = 32,2$ МПа $\sqrt{м}$ и $\sigma_c = 777$ МПа) приводит к снижению циклов нагружения всего лишь на 4 %.

Таким образом, расчет показывает, что температурные и остаточные напряжения не оказывают заметного влияния на живучесть рельса. В эксплуатационных условиях эти напряжения практически не поддаются определению. Они подвержены изменению в течение суток, меняются от сечения к сечению, зависят от плана и профиля пути, марки (производителя) стали, степени деградации первоначальных механических свойств стали и т. п. Можно согласиться с выводом, сделанным в работе [15], что «остаточные напряжения в изделиях, подверженных циклическому повторно-переменному нагружению, относятся к числу учитываемых в современной механике разрушения факторов, но не являются определяющими процесс разрушения».

Однако следует принять во внимание, что понижение температуры рельсов приводит к их охрупчиванию и уменьшению вязкости разрушения стали K_{Ic} . В работе [16] установлено, что понижение температуры рельса с +20 до –60 °С приводит к снижению вязкости разрушения на 34 % для нетермоупрочненных рельсов и на 32 % для объемно закаленных. В связи с этим в работе [17] предлагается для обеспечения низкотемпературной надежности установить норму критической трещиностойкости рельсовой стали для всех климатических регионов в размере $K_{Ic} = 25$ МПа $\sqrt{м}$.

Расчет по формуле (1) показывает, что снижение критической трещиностойкости

с $K_{Ic} = 32,2$ МПа $\sqrt{м}$ до $K_{Ic} = 25$ МПа $\sqrt{м}$ приводит к падению числа допустимых циклов нагружения на 40 %, то есть существенно влияет на остаточный ресурс рельсов с ВПТ.

С другой стороны, при увеличении температуры может снижаться статическая прочность стали σ_c . Проследить влияние температуры на прочность и трещиностойкость можно на примере стали 45ХН2МФА.

Температурные зависимости вязкости разрушения K_{Ic} и статической прочности на разрыв σ_c для данной стали содержатся в работе [18]. Образцы из указанной стали промышленной выплавки подвергали термообработке по четырем режимам. Здесь рассмотрим лишь два:

а) режим А: нагрев до 860 °С (1133 К), выдержка 30 мин, закалка в масле;

б) режим Б¹: нагрев до 1150 °С (1423 К), выдержка 30 мин, закалка в масле + повторный нагрев со скоростью 1–2 °С в интервале 680–860 °С (923–1133 К), выдержка 30 мин при 860 °С (1133 К), закалка в масле.

Все образцы после закалки отпускали при 200 °С (473 К) в течение двух часов.

В диапазоне температуры испытаний от –200 °С до +40 °С (~75...315 К) приведенные в [18] температурные зависимости вязкости разрушения (МПа $\sqrt{м}$) и прочности (МПа) можно аппроксимировать выражениями:

- режим термообработки А:

$$\sigma_c(T) = 1950 + \frac{54\,500}{T}, \quad K_{Ic}(T) = 14 + 0,10T;$$

- режим термообработки Б:

$$\sigma_c(T) = 2235 + \frac{33\,500}{T}, \quad K_{Ic}(T) = 27 + 0,14T,$$

где T — температура испытаний, К ($75 \leq T \leq 315$).

С увеличением температуры статическая прочность стали 45ХН2МФА уменьшается, а вязкость разрушения, наоборот, возрастает. В результате, структурный параметр разрушения d , входящий в равенство (1), с повышением температуры увеличивается (рис. 1). Если указанная тенденция справедлива и для рельсовых сталей, то можно оценить «чувствительность» живучести рельса к величине d .

В табл. 1 приведены прочностные характеристики некоторых рельсовых сталей, расположенных по возрастанию параметра d . Как видно из

¹ В работе [18] это режим Г.

Рис. 1. Зависимость структурного параметра разрушения от температуры для стали 45ХН2МФА (А, Б — режимы термообработки)

таблицы, сталь RS1400 отличается от стали 700 по величине d в 9 раз.

Расчет числа допустимых циклов нагружения по формуле (1) (рельс Р65, $a_n = 6,6$ мм, $a_k = 16,3$ мм (5 и 30 % от площади головки)) показывает, что для стали RS1400 он равен $N = 1,049 \cdot 10^8$, а для стали 700 — $N = 7,964 \cdot 10^7$, то есть относительная разница составляет 24,1 %. Поэтому влияние температуры на характеристики прочности и трещиностойкости, и, соответственно, на долговечность рельсов нельзя недооценивать. При этом наибольшую опасность представляют низкие температуры (от -20 °С и ниже), при которых объем изъятия рельсов из эксплуатации по различным дефектам в 2,5–3 раза выше, чем при летних [17].

Влияние соседних колес

Учитывая высокую жесткость основания, влияние удаленных сосредоточенных сил можно не учитывать, а ограничиться рассмотрением сил от ближайших двухосных тележек экипажа. Суммарный изгибающий момент определяем по формуле

$$M(z) = \sum_i \frac{P_i}{4k} e^{-k|z-z_i|} (\sin k|z-z_i| - \cos k|z-z_i|),$$

где P_i — сила, соответствующая i -му колесу, приложенная в точке с координатой z_i ; k — коэффициент относительной жесткости основания. Как расчетный случай далее полагаем $P_i = P = \text{const}$.

Для примера на рис. 2 приведена эпюра суммарного изгибающего момента при действии четырех сосредоточенных сил, приложенных в сечениях $z = 0; 1; 3; 4$ м, величиной 100 кН каждая. На рис. 3 приведена эпюра суммарного изгибающего момента при воздействии на балку колес соседних тележек четырехосного полувагона при $P = 100$ кН.

Введем обозначения: M_Σ — суммарный максимальный обратный изгибающий момент от воздействия четырех сосредоточенных сил; M_1 — максимальный обратный изгибающий момент от действия одной силы. В табл. 2 приведено соотношение M_Σ / M_1 при $P = 100$ кН для некоторых типов экипажей.

В среднем можно считать, что максимальный суммарный обратный изгибающий момент от четырех сосредоточенных сил превышает таковой от одиночной силы в два раза. В силу линейной упругости такое же превышение будут иметь

Таблица 1

Механические свойства рельсовых сталей

№ п/п	Марка стали	σ_c , МПа	K_{lc} , МПа $\sqrt{\text{м}}$	d , мм	Источник
1	RS1400 (РЖД)	1452	43,0	0,56	[19]
2	1100CrSiV (136RE)	1173	37,9	0,67	[20]
3	900 CrSiV (EB50)	1051	37,0	0,79	[20]
4	CHHR (132RE)	1265	46,0	0,84	[20]
5	900B (A65)	964	39,5	1,07	[20]
6	900ASTM (MRS67)	901	40,0	1,25	[20]
7	75Г (РЖД)	1080	50,0	1,36	[21]
8	RS600 (РЖД)	680	40,0	2,20	[22]
9	RS700 (РЖД)	740	46,0	2,46	[22]
10	700 (МСЖД60)	777	70,0	5,17	[20]

Рис. 2. Распределение суммарного изгибающего момента при действии четырех сосредоточенных сил

Рис. 3. Эпюра суммарного изгибающего момента для полувагона

Таблица 2

Соотношение суммарного и одиночного изгибающего момента

	Полувагон	Цистерна или хоппер	Крытый вагон	Платформа
M_{Σ} / M_1	1,95	2,12	2,00	1,95

растягивающие напряжения в балке и соответствующий коэффициент интенсивности напряжений для внутренней поперечной трещины.

Расчет по формуле (1) (при $K_{Ic} = 32,2 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, $\sigma_c = 777 \text{ МПа}$, $a_n = 6,6 \text{ мм}$, $a_k = 16,3 \text{ мм}$, $P = 100 \text{ кН}$) показывает, что допустимое количество циклов

нагружения при воздействии одиночной силы $N_1 = 1,684 \cdot 10^7$ циклов, а при действии четырех (две соседние двухосные тележки экипажа) снижается на порядок, до $N_{\Sigma} = 1,051 \cdot 10^6$ циклов, или на 94 %, что, очевидно, необходимо принимать во внимание при определении долговечности конструкции.

Заключение

Проведенные расчеты показывают, что температурные и остаточные напряжения оказывают слабое влияние на циклическую трещиностойкость балки с внутренней поперечной трещиной. В то же время полученные результаты свидетельствуют о сильной зависимости вязкости разрушения материала от температуры, что в значительной степени влияет на интенсивность развития дефекта.

Также данные расчетов показывают существенное взаимовлияние соседних колес экипажа на величину суммарного обратного изгибающего момента и соответствующих ему продольных напряжений в балке и в конечном итоге на остаточный ресурс конструкции.

Библиографический список

1. Яковлева Т. Г., Карпущенко Н. И., Клинов С. И., Путьря Н. Н., Смирнов М. П. Железнодорожный путь. М.: Транспорт, 2001. 407 с.
2. Смирнов В. И., Видюшенков С. А., Майер С. С. Усталостное разрушение балки с внутренней поперечной трещиной при многоцикловом нагружении // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 2 (79). С. 75–81.
3. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.
4. Петров Ю. В., Смирнов В. И. О прочности материалов с малыми дефектами // Известия РАН. Механика твердого тела. 2006. № 4. С. 165–177.
5. Смирнов В. И., Майер С. С. О влиянии границ тела на циклическую трещиностойкость рельса с внутренним поперечным дефектом // Проблемы прочности материалов и конструкций в транспортном строительстве: сб. тр. междунар. науч.-практ. конф., посв. 175-летию со дня рождения профессора Н. А. Белелюбского. СПб.: ПГУПС, 2021. С. 186–193.
6. Orringer O., Morris J. M., Steele R. K. Applied research on rail fatigue and fracture in the United States // Theor. and Appl. Fract. Mech. 1984. Vol. 1. Pp. 23–49.
7. Orringer O., Morris J. M., Jeong D. Y. Detail fracture growth in rails: test results // Theor. and Appl. Fract. Mech. 1986. Vol. 5. Pp. 69–95.
8. Orringer O., Tang Y. H., Gordon J. E., Jeong D. Y., Morris J. M., Perlman A. B. Crack propagation life of detail fractures in rails. US Department of transportation, Research and special programs administration, Volpe national transportation systems center, Cambridge, MA 02142. Final report. October 1988. 198 p.
9. Orringer O., Steele R. K. Structural integrity of rail in railroad track in the United States // Fracture Mechanics: Nineteenth Symposium, ASTM STP 969. T. A. Cruse (Ed.).

American Society for Testing and Materials. Philadelphia, 1988. Pp. 260–278.

10. Вексер Н. А., Казарновский Д. С. Влияние способов термического упрочнения на живучесть рельсов // Проблемы прочности. 1972. № 12. С. 111–113.
11. Шур Е. А. О выборе допускаемых напряжений при прочностных расчетах рельсов // Вестник ВНИИЖТ. 1977. № 8. С. 38–41.
12. Майр Р., Гроенхут Р. Развитие поперечных усталостных дефектов в головке железнодорожных рельсов // Железные дороги мира. 1981. № 10. С. 44–53.
13. Рейхарт В. А., Межова Н. Я., Арефьева Т. Н., Ременяк Н. П. Конструкционная прочность рельсов // Вестник ВНИИЖТ. 1991. № 2. С. 34–37.
14. Jablonski D., Tang Y. H., Pelloux R. M. Simulation of railroad crack growth life using laboratory specimens // Theor. and Appl. Fract. Mech. 1990. Vol. 14. № 1. Pp. 27–36.
15. Ахметзянов М. Х. О механизме развития контактно-усталостных повреждений в рельсах // Вестник ВНИИЖТ. 2003. № 2. С. 41–45.
16. Абдурашитов А. Ю., Георгиев М. Н., Межова Н. Я., Рейхарт В. А. О статической трещиностойкости железнодорожных рельсов и рельсовой стали // Заводская лаборатория. 1992. № 6. С. 41–43.
17. Рейхарт В. А. К вопросу о надежности рельсов при низких климатических температурах // Вестник ВНИИЖТ. 1992. № 7. С. 7–11.
18. Романив О. Н., Ткач А. Н., Вольдемаров А. В. Об одном способе комплексного повышения механических свойств низкоотпущенных конструкционных сталей // Физико-механическая механика материалов. 1979. Т. 15, № 4. С. 71–77.
19. Нестеров Д. К., Сапожков В. Е., Левченко Н. Ф., Евдокимов Б. А., Шевченко А. И. Конструкционная прочность и эксплуатационная стойкость рельсов из заэвтектидной стали, термообработанных на высокую прочность // Транспорт: наука, техника, управление. 1991. № 8. С. 9–13.
20. Производство упрочненных рельсов // Железные дороги мира. 1991. № 11. С. 41–51.
21. Ковчик С. Е., Морозов Е. М. Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов и методы их определения // Механика разрушения и прочность материалов. В 4 т. / под общ. ред. В. В. Панасюка. Киев: Наукова думка, 1988. Т. 3. 436 с.
22. Филин А. Н., Чельшев Н. А., Гулянский В. Н. Исследование механических характеристик рельсовой стали опытно-промышленных плавок // Изв. вузов. Черная металлургия. 1991. № 2. С. 43–44.

References

1. Yakovleva T. G., et al. *Zheleznodorozhnyi put'* [Railway track]. Moscow, Transport Publ., 2001, 407 p.

2. Smirnov V. I., Vidyushenkov S. A., Maier S. S. *Ustalostnoe razrushenie balki s vnutrenney poperechnoy treshchinoy pri mnogotsiklovom nagruzhenii* [Fatigue fracture of the beam with an internal transverse crack under multi-cycle loading]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2020, no. 2 (79), pp. 75–81.
3. Cherepanov G. P. *Mekhanika khrupkogo razrusheniya* [Mechanics of brittle fracture]. Moscow, Nauka Publ., 1974, 640 p.
4. Petrov Yu. V., Smirnov V. I. *O prochnosti materialov s malymi defektami* [On the strength of materials with small defects]. *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela – Izvestiya RAS. Solid State Mechanics*, 2006, no. 4, pp. 165–177.
5. Smirnov V. I., Maier S. S. *O vliyani granits tela na tsiklicheskiy treshchinostoykost' rel'sa s vnutrennim poperechnym defektom* [On the influence of body boundaries on the cyclic crack resistance of a rail with an internal transverse defect]. *Trudy mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashchennoy 175-letiyu so dnya rozhdeniya professora N. A. Belebyskogo «Problemy prochnosti materialov i konstruktsiy v transportnom stroitel'stve»* [Proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the 175-th anniversary of the birth of Professor N. A. Belebysky "Problems of strength of materials and structures in transport construction"]. St. Petersburg, PGUPS Publ., 2021, pp. 186–193.
6. Orringer O., Morris J. M., Steele R. K. Applied research on rail fatigue and fracture in the United States. *Theor. and Appl. Fract. Mech.*, 1984, vol. 1, pp. 23–49.
7. Orringer O., Morris J. M., Jeong D. Y. Detail fracture growth in rails: test results. *Theor. and Appl. Fract. Mech.*, 1986, vol. 5, pp. 69–95.
8. Orringer O., et al. *Crack propagation life of detail fractures in rails*. US Department of transportation. Research and special programs administration. Volpe national transportation systems center, Cambridge, MA 02142. Final report. October 1988, 198 p.
9. Orringer O., Steele R. K. *Structural integrity of rail in railroad track in the United States*. Fracture Mechanics: Nineteenth Symposium, ASTM STP 969. T. A. Cruse (Ed.). American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1988, pp. 260–278.
10. Vekser N. A., Kazarnovskiy D. S. *Vliyanie sposobov termicheskogo uprochneniya na zhivuchest' rel'sov* [Influence of thermal hardening methods on the survivability of rails]. *Problemy prochnosti – Problems of strength*, 1972, no. 12, pp. 111–113.
11. Shur E. A. *O vybere dopuskaemykh napryazheniy pri prochnostnykh raschetakh rel'sov* [On selecting of permissible stresses in strength calculations of rails]. *Vestnik VNIIZhT – VNIIZHT Scientific Journal*, 1977, no. 8, pp. 38–41.
12. Maier R., Groenkhut R. *Razvitie poperechnykh ustalostnykh defektov v golovke zheleznodorozhnykh rel'sov* [Development of transverse fatigue defects in the head of railway rails]. *Zheleznye dorogi mira – Railways of the world*, 1981, no. 10. S. 44–53.
13. Reykhart V. A., Mezheva N. Ya., Aref'eva T. N., Remenyak N. P. *Konstruktsionnaya prochnost' rel'sov* [Structural strength of rails]. *Vestnik VNIIZhT – VNIIZHT Scientific Journal*, 1991, no. 2, pp. 34–37.
14. Jablonski D., Tang Y. H., Pelloux R. M. Simulation of railroad crack growth life using laboratory specimens. *Theor. and Appl. Fract. Mech.*, 1990, vol. 14, no. 1, pp. 27–36.
15. Akhmetzyanov M. Kh. *O mekhanizme razvitiya kontaktno-ustalostnykh povrezhdeniy v rel'sakh* [On the mechanism of development of contact-fatigue damage in rails]. *Vestnik VNIIZhT – VNIIZHT Scientific Journal*, 2003, no. 2, pp. 41–45.
16. Abdurashitov A. Yu., Georgiev M. N., Mezheva N. Ya., Reykhart V. A. *O staticheskoy treshchinostoykosti zheleznodorozhnykh rel'sov i rel'sovoy stali* [Regarding static crack resistance of railway rails and rail steel]. *Zavodskaya laboratoriya – Factory Laboratory*, 1992, no. 6, pp. 41–43.
17. Reykhart V. A. *K voprosu o nadezhnosti rel'sov pri nizkikh klimaticheskikh temperaturakh* [On the reliability of rails at low climatic temperatures]. *Vestnik VNIIZhT – VNIIZHT Scientific Journal*, 1992, no. 7, pp. 7–11.
18. Romaniv O. N., Tkach A. N., Voldemarov A. V. *Ob odnom sposobe kompleksnogo povysheniya mekhanicheskikh svoystv nizkootpushchennykh konstruktsionnykh staley* [On the method for complex improvement of mechanical properties of low-grade structural steels]. *Fiziko-mekhanicheskaya mekhanika materialov – Physical and mechanical mechanics of materials*, 1979, vol. 15, no. 4, pp. 71–77.
19. Nesterov D. K., et al. *Konstruktsionnaya prochnost' i ekspluatatsionnaya stoykost' rel'sov iz zaevektoidnoy stali, termoobrabotannykh na vysokuyu prochnost'* [Structural strength and operational stability of rails made of hypereutectoid steel, thermally treated for high strength]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie – Transport: Science, Technology, Management*, 1991, no. 8, pp. 9–13.
20. *Proizvodstvo uprochnennykh rel'sov* [Production of reinforced rails]. *Zheleznye dorogi mira – Railways of the world*, 1991, no. 11, pp. 41–51.
21. Kovchik S. E., Morozov E. M. *Kharakteristiki kratkovremennoy treshchinostoykosti materialov i metody ikh opredeleniya* [Characteristics of short-term crack resistance of materials and methods of specifying them]. *Mekhanika razrusheniya i prochnost' materialov* [Fracture mechanics and strength of materials]. In 4 vols. Ed. by. Panasyuk V. V. Kiev, Naukova dumka Publ., 1988, vol. 3, 436 p.
22. Filin A. N., Chelyshev N. A., Gul'nyashkin V. N. *Issledovanie mekhanicheskikh kharakteristik rel'sovoy stali opytno-promyshlennykh plavok* [Research of mechanical characteristics of rail steel of experimental-industrial melting]. *Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya – Ferrous Metallurgy*, 1991, no. 2, pp. 43–44.