

05

Структурно-фазовое состояние металла рельса с внутренней трещиной после длительной эксплуатации

© С.А. Атрошенко,^{1,3} С.С. Майер,² В.И. Смирнов²

¹ Институт проблем машиноведения РАН,
199178 Санкт-Петербург, Россия

² Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,
190031 Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный университет,
199034 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: satroshe@mail.ru

Поступило в Редакцию 19 марта 2021 г.

В окончательной редакции 10 апреля 2021 г.

Принято к публикации 14 апреля 2021 г.

В процессе эксплуатации при циклическом силовом воздействии в металле рельсов со временем происходят различные физико-механические процессы: пластическая деформация поверхности катания, образование внутренних и поверхностных трещин, изменение остаточных напряжений и др. Как следствие, ухудшаются механические характеристики и снижается работоспособность рельсов. Выполнен микроструктурный анализ поверхности сечения двух рельсов с внутренними трещинами — продольной и поперечной. Рельсовые пробы изъяты из эксплуатации после многолетнего срока службы. Фрактографический анализ поверхности трещины и окружающего ее материала указывает на значительную деградацию физико-механических свойств рельсовой стали и интенсивное структурообразование в процессе длительной эксплуатации рельсов.

Ключевые слова: рельсовая сталь, металлография, усталостная трещина, микроструктура металла, поверхность разрушения.

DOI: 10.21883/JTF.2021.09.51215.72-21

Введение

Результаты полигонных испытаний рельсов с различными физико-механическими свойствами показывают [1–7], что большое влияние на стойкость к образованию контактно-усталостных дефектов оказывает однородная и мелкодисперсная микроструктура. Также большую роль играют такие параметры микроструктуры рельсов, как величина межпластиночного расстояния в перлите, величина перлитных колоний, наличие избыточного феррита [5,7]. Эксплуатационная стойкость металла с более однородной структурой выше и увеличивается с ростом твердости только у рельсов с гомогенной структурой, причем наибольшей конструктивной прочностью рельсов, по мнению различных авторов, обладают рельсы либо при однородной структуре сорбита закалки максимальной дисперсности, либо при однородной структуре отпущенного мартенсита.

Образцы Rail_1, Rail_2 и Rail_3 изучались в работах [8,9]. Исследование структуры образца Rail_1 в области 1 (рис. 1, долом рельса) [9] выявило анизотропию и пористость вблизи поверхности разрушения, а также микротрещины, идущие вглубь материала и вдоль прокатки. Микроструктура — пластинчатый перлит и области динамической рекристаллизации, аналогичные выявленным в [8]. Структура поверхности трещины (область 2 на рис. 1) представлена микротрещинами [9] и полосой с избыточным ферритом в виде ферритной

сетки и зерен феррита, что вызывает охрупчивание материала, наблюдаются также отдельные двойники и динамическая рекристаллизация. Появление двойников связано с мартенситным превращением (двойникованным мартенситом), что зависит от скорости термоциклирования и термической предыстории металла [10].

Структура образца Rail_2 в области долома рельса (1 на рис. 1) [9] — волокнисто-деформированный перлит и зоны динамической рекристаллизации, а на поверхности усталостной трещины (2 на рис. 1) сетка микротрещин, пластинчатый перлит и отдельные зерна феррита, иногда — ферритная сетка. Микротрещины в области 3 (рис. 1) идут по границам зерен феррита, выявлены зоны динамической рекристаллизации и большое количество пор, а также глобулярный перлит, появившийся в результате превращения пластинчатого перлита при нагреве стали в процессе работы рельса.

Структура образца Rail_3 в области долома рельса (1 на рис. 1) представлена сеткой микротрещин, ферритными зернами, динамической рекристаллизацией наряду с крупными зернами пластинчатого перлита. Микротрещины идут по ферритной сетке и в ферритных зернах. Присутствует также полоса избыточного феррита в виде ферритной сетки. На поверхности усталостной трещины (2 на рис. 1) структура представляет пластинчатый перлит с зонами динамической рекристаллизации, а также двойники. Избыточный феррит представлен в виде

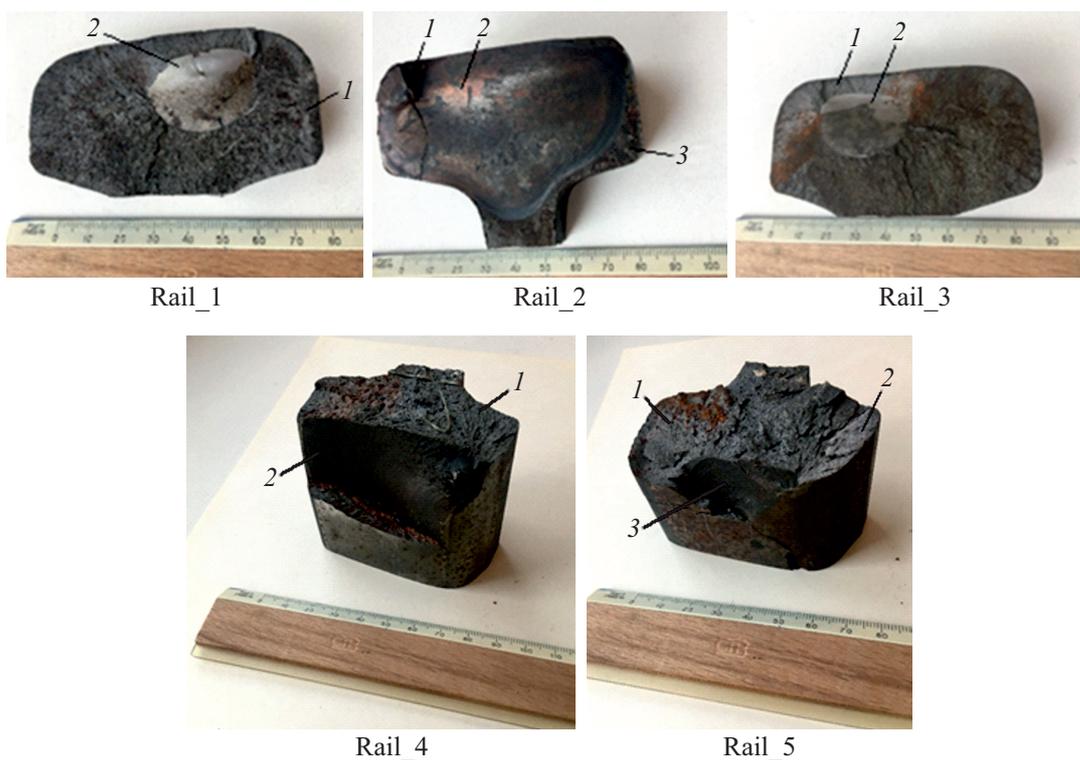


Рис. 1. Общий вид образцов рельсов.

сетки, что способствует охрупчиванию и приводит к разрушению [9].

1. Материал и методика исследования

Исследования проводились на дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсах типа Р65 с внутренними поперечной и продольной трещинами. Так как подробное исследование образцов Rail_1, Rail_2 и Rail_3 описано в работах [8,9], то в настоящей работе

Таблица 1. Данные испытаний и приемочные показатели испытанных рельсовых проб

Образец	F , kN	L , mm	F_{\min} , kN	L_{\min} , mm
Rail_1	86	2.2	1750	23
Rail_2	195	5.2	1750	23
Rail_3	540	5.4	1750	23
Rail_4	770	7.2	1750	23
Rail_5	—	—	1750	23

Примечание. F — разрушающая нагрузка, L — стрела прогиба, данные после испытаний на статический поперечный изгиб, F_{\min} , L_{\min} — наименьшие (допускаемые) приемочные показатели прочности и жесткости при статическом поперечном изгибе с нагружением на подошву рельса.

проводится анализ образцов Rail_4 и Rail_5, а в таблицах для сравнения даны результаты всех пяти образцов. В качестве материала исследования использовали пять

Таблица 2. Доля вязкой составляющей (%B) в изломе рельсовых сталей

Материал	Область	%B
Rail_1	1	97.04
	2	92.18
	переходная	97.60
Rail_2	1	96.18
	2	97.61
	3	92.45
Rail_3	1	96.96
	2	92.08
	переходная	96.10
Rail_4	1 — поперек	98.70
	2 — вдоль	95.70
Rail_5	1 — поперек	98.30
	2 — поперек	93.10
	3 — вдоль	96.90

Таблица 3. Количественные характеристики микроструктуры рельсовой стали в различных областях разрушения

Name	Область	$D_{grain}, \mu m$	$h_{perlite}, d_p, \mu m$	$L_{tw} \times H_{tw}, \mu m$	$h_{mart}, \mu m$	$h_{ferrite}, d_f, \mu m$	Мартенсит, двойники	Избыток феррита
Rail_1	1	8–45	$h = 0.3–1.0$	–		–		
	2	4–20	$h = 0.3–0.6$	18.3×0.5		$h = 0.8–2.4$	Мартенсит, двойники	Сетка, зерна
Rail_2	1	4–12	$h = 0.3–0.7$	–		$h = 0.5–1.6$		Сетка
	2	6–18	$h = 0.4–1.5$	–		$h = 0.4–1.8$		Тонкая сетка, зерна
	3	3–11	$h = 3.0–5.0$ $d = 0.8–1.0$	–		–		–
Rail_3	1	11–23	$h = 0.3–1.6$	–		$h = 1.5–5.8$ $d = 5.8–14.9$		Сетка, зерна
	2	7–22	$h = 0.5–0.8$	24.2×0.8		$h = 0.6–1.8$	Мартенсит, двойники	Сетка
Rail_4	1-вдоль	$D_{sf} = 5–10$ $D_{ct} = 50–60$	$h = 0.1–2.8$	66.5×1.0			Двойники	–
	2-вдоль	$D_{sf} = 10–20$ $D_{ct} = 90–100$	$h = 7.7–13.3$ $d = 0.7–4.6$					–
Rail_5	1-поперек	13–101	$h = 1.4–3.3$			$h = 7.0–10.0$		Обрывки сетки
	2-поперек							
	3-вдоль	45–121	$h = 2.8–5.5$ $d = 1.4–4.0$	71.6×2.5	58–490	–	Полоса мартенсита, двойники	–

Примечание. D_{grain} — размер зерна, D_{sf} — размер зерна на поверхности у края продольной трещины, D_{ct} — размер зерна в центре, $h_{perlite}$ — межпластиночное расстояние в перлите, d_p — диаметр глобулярного перлита, $L_{tw} \times H_{tw}$ — размеры двойников, h_{mart} — ширина полосы мартенсита, $h_{ferrite}$ — толщина ферритной сетки, d_f — размер ферритного зерна.

образцов рельсовой стали, свойства и элементный состав которых регламентирует ГОСТ Р 51685–2013. Для анализа разрушения были вырезаны рельсовые пробы длиной 1.1–1.2 м, которые испытывались на статический поперечный изгиб с нагружением на подошву образцов рельса с определением показателей прочности и пластичности на прессе ПМС 320.

Доля вязкой составляющей в изломе стали определялась по ASTM E 436-03. Исследование поверхности разрушения проводилось на микроскопе Axio Observer Z1-M в темном поле при увеличении 100, а микроструктура поперечного сечения анализировалась в светлом поле и контрасте C_DIC на том же микроскопе.

2. Результаты и их обсуждение

Данные испытаний на трехточечный изгиб и наименьшие приемочные показатели испытанных рельсовых проб приведены в табл. 1. Срок службы изъятых из эксплуатации рельсов 18–19 лет. За этот срок рельсы подверглись ориентировочно $(5–50) \cdot 10^6$ циклам нагружения, т.е. проходам колеса. Как видно из таблицы, все испытанные рельсовые пробы не удовлетворяют нормативным требованиям прочности и жесткости, что

свидетельствует о том, что дефекты обнаружены с большим опозданием.

2.1. Исследование поверхности разрушения

Внешний вид поверхности разрушения испытанных образцов представлен на рис. 1, а доля вязкой составляющей на поверхности излома (%B) представлена в табл. 2.

Области измерения вязкой составляющей соответствуют указанным на рис. 1: область 2 — поверхность усталостной трещины, области 1, 3 — зоны долома для образцов Rail_1, Rail_2 и Rail_3, а для образцов Rail_4 и Rail_5 с продольными трещинами: 2 (Rail_4), 3 (Rail_5) — усталостная трещина, а 1 (Rail_4, Rail_5) и 2 (Rail_5) — зона долома. В табл. 2 также представлено количество волокна в переходной зоне для Rail_1 и Rail_3 образцов.

Как видно из табл. 2, в образцах Rail_1, Rail_3 наблюдается наибольшее уменьшение доли вязкой составляющей на поверхности трещины. Что касается образца Rail_2, то здесь наибольшее уменьшение доли вязкой составляющей происходит на прифронтной поверхности трещины, затем по мере развития трещины в глубину

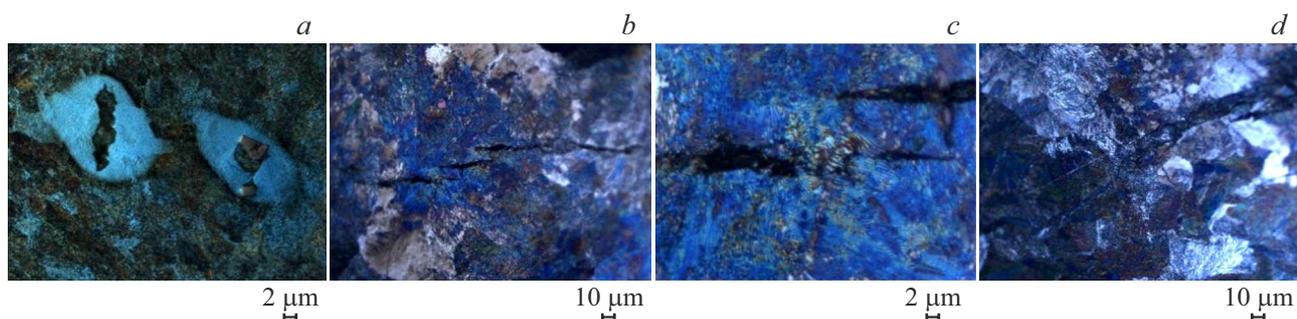


Рис. 2. Структура области 1 образца Rail_4: *a* — $\times 1000$ (C_DIC), *b* — $\times 500$, *c* — $\times 2500$, *d* — $\times 500$.

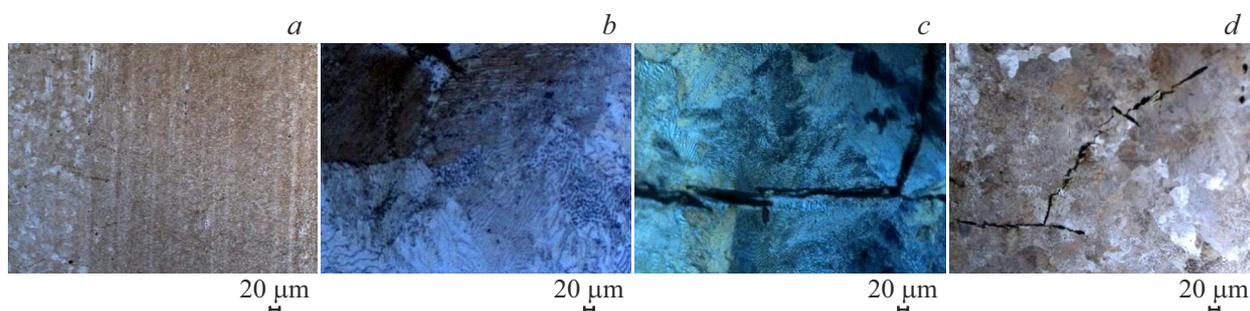


Рис. 3. Структура области 2 образца Rail_4: *a* — $\times 25$, *b* — $\times 2500$, *c* — $\times 1000$ (C_DIC), *d* — $\times 200$.

она повышается. Для образцов Rail_4, Rail_5 наибольшее уменьшение доли вязкой составляющей оказалось в продольной части усталостной трещины (табл. 2).

Такое поведение металла становится более понятным после исследования микроструктуры поперечных шлифов в соответствующих областях разрушения.

2.2. Исследование микроструктуры поперечных шлифов рельсовых образцов

Количественная оценка микроструктурных элементов приведена в табл. 3.

2.2.1. Rail_4

Область 1

Структура поверхности образца Rail_4 в области 1 (рис. 1, долом рельса — поперечное разрушение) представлена на рис. 2.

Виден пластинчатый перлит (рис. 2, *b, c*) и области динамической рекристаллизации (рис. 2, *a*). Присутствует разрушение в виде трещин, подобных множественному отколу (рис. 2, *b, c*), а также двойники (рис. 2, *d*).

Область 2

Структура поверхности образца Rail_4 в области 2 (рис. 1, поверхность продольной усталостной трещины) представлена на рис. 3.

В образце Rail_4 от края продольной трещины до основного металла на расстоянии 790–6500 μm присутствует наклепанный слой (рис. 3, *a*), который образовался в процессе циклической пластической деформации, это более мелкозернистая зона с размером зерна 10–20 μm , в то время как в центре размер зерна составляет 50–110 μm (табл. 3). На границе мелкозернистой зоны с основным металлом много микротрещин, идущих вдоль прокатки от неметаллических включений.

На снимках также виден пластинчатый перлит разной дисперсности (рис. 3, *b, c*) и глобулярный перлит (рис. 3, *b*), который появился в результате превращения пластинчатого перлита при нагреве стали до высокой температуры в процессе работы рельса. Также наблюдается довольно разветвленная микротрещина (рис. 3, *d*).

2.2.2. Rail_5

Области 1 и 2

Структура поверхности образца Rail_5 в области 1 и 2 (рис. 1, долом рельса — поперечное разрушение) представлена на рис. 4.

Видна разветвленная микротрещина (рис. 4, *a*) и области избыточного феррита в виде разорванной сетки (рис. 4, *b*). Микротрещины в некоторых местах напоминают ступенчатую откольную щель в ударно-нагруженной стали (рис. 4, *c*).

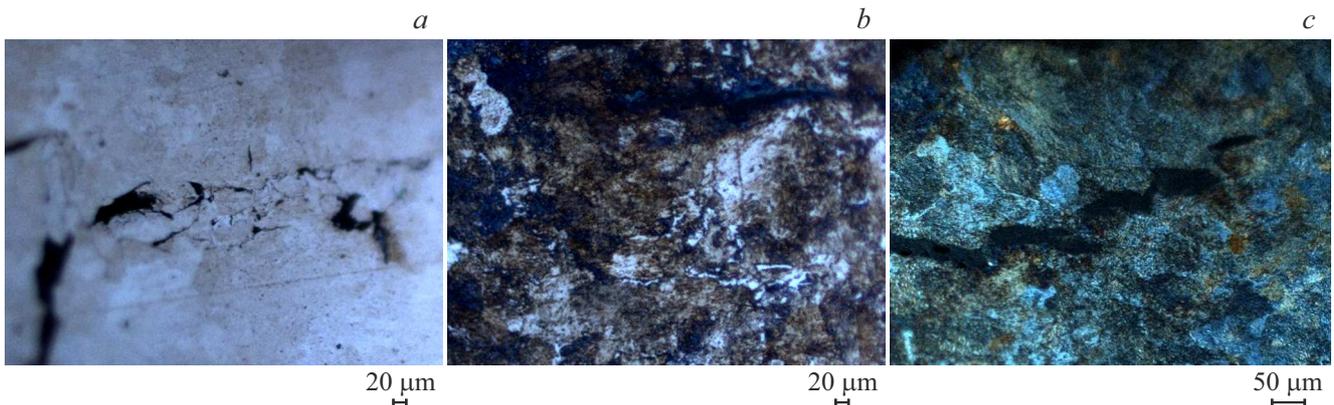


Рис. 4. Структура областей 1 и 2 образца Rail_5: *a* — $\times 1000$, *b* — $\times 1600$, *c* — $\times 1000$ (C_DIC).

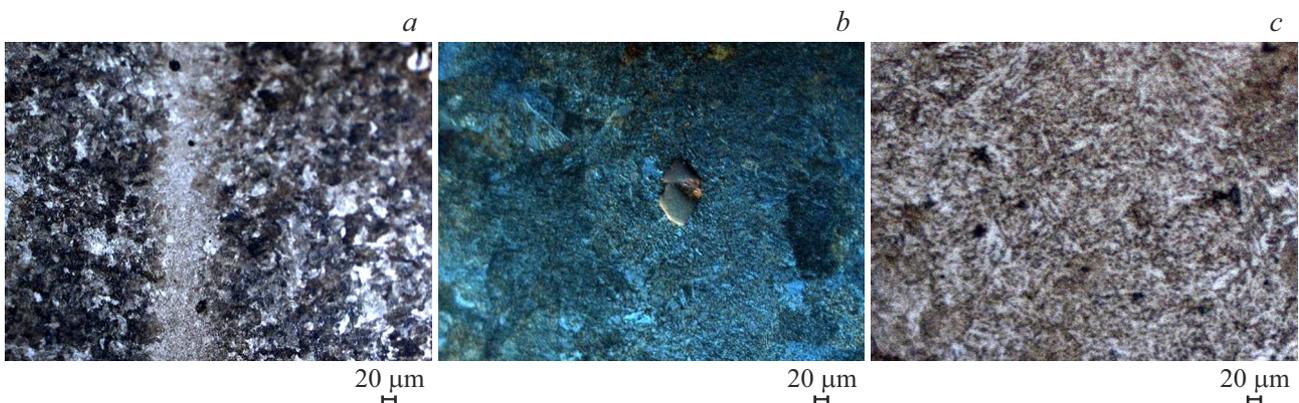


Рис. 5. Структура области 3 образца Rail_5: *a* — $\times 200$, *b* — $\times 1000$ (C_DIC), *c* — $\times 2500$.

Область 3

Структура поверхности образца Rail_5 в области 3 (рис. 1, поверхность продольной усталостной трещины) представлена на рис. 5.

В этой области присутствует довольно широкая полоса мартенсита (табл. 3), расположенная вдоль продольной поверхности разрушения (рис. 5, *a, b*), в этом районе, вероятно, произошел резкий подъем температуры при эксплуатации рельса и быстрое охлаждение, что вызвало мартенситное превращение в отдельной полосе. Также присутствуют двойники (рис. 5, *b*), а в области перлита наряду с пластинчатым наблюдается глобулярный перлит (рис. 5, *c*).

Заключение

1. Длительная эксплуатация рельсов приводит к интенсивному структурообразованию в результате следующих процессов:

- динамическая рекристаллизация,
- наклеп,
- трещинообразование,
- двойникование,

- мартенситное превращение,
- гомогенизация перлита — переход пластинчатого перлита в глобулярный.

2. Значительное влияние на сопротивление усталостному разрушению оказывает объем феррита в зоне образования трещины: чем оно меньше, тем выше устойчивость к разрушению.

3. На поверхности разрушения исследованных образцов рельсовой стали выделяются области, отличающиеся по доли вязкой составляющей: наибольшее снижение доли вязкой составляющей в образцах Rail_1 и Rail_3 наблюдается на стадии усталостного роста трещины, где наблюдается избыточный феррит в виде разветвленной сетки, которая занимает большую площадь поверхности, а также присутствуют мартенсит и двойники, что способствует снижению пластичности. Образец Rail_2 отличается наибольшим снижением доли вязкой составляющей в приповерхностной области головки рельса, что можно объяснить наличием грубой ферритной сетки с самой большой толщиной, а также самым дисперсным перлитом. Для образцов Rail_4 и Rail_5 наибольшим снижением доли вязкой составляющей оказалось разрушение в продольной части усталостной трещины, хотя оно оказалось меньшим, чем у образцов Rail_1,

Rail_2 и Rail_3 из-за меньшего количества избыточного феррита.

4. Наиболее высокая разрушающая нагрузка и стрела прогиба наблюдаются у образца Rail_4, что объясняется не только меньшим размером трещины по сравнению с другими пробами, но и наклепом, наличием мартенсита, мелкодисперсного и глобулярного перлита с относительно мелким зерном, а также динамической рекристаллизацией с образованием микрокристаллических зон высокой твердости.

5. Практическая ценность данного исследования состоит в выявлении особенностей структурообразования при работе рельсовых сталей и будет полезна как разработчикам материала, так и специалистам, эксплуатирующим эти материалы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Y.D. Li., C.B. Liu., N. Xu., X.F. Wu. W.M. Guo, J.B. Shi. Case Studies in Engineering Failure Analysis, **1**, 243 (2013). <http://dx.doi.org/10.1016/j.csefa.2013.09.003>
- [2] D.F. Cannon, K.-O. Edel, S.L. Grassie, K. Sawley Fatigue Fracture of Engineering Materials Structures, **26**(10), 865 (2003).
- [3] L.B. Godefroid, G.L. Faria, L.C. Cândido, T.G. Viana. Engineering Failure Analysis, **58**, 407 (2015). <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.05.022>
- [4] Д.К. Нестеров, В.Е. Сапожков, Н.Ф. Левченко, Б.А. Евдокимов, А.И. Шевченко. Транспорт: наука, техника, управление, **8**, 9 (1991).
- [5] Е.В. Полевой, А.Б. Добужская, М.В. Темлянец. Вестник ПНИПУ, **18** (4), 7 (2016). DOI: 10.15593/2224-9877/2016.4.01
- [6] Е.А. Шур, А.И. Борц, А.В. Сухов, А.Ю. Абдурашитов, Л.В. Базанова, К.Л. Заграничек. Вестник ВНИИЖТ, **3**, 3 (2015).
- [7] Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов, О.А. Перегудов, К.В. Морозов, А.Б. Юрьев. Известия вуз. Черная металлургия, **59** (8), 576 (2016). DOI: 10.17073/0368-0797-2016-8-576-580
- [8] С.А. Атрошенко, С.С. Майер, В.И. Смирнов. ФТТ, **62** (10), 1573 (2020). DOI: 10.21883/FTT.2020.10.49898.094 [S.A. Atroshenko, S.S. Mayer, V.I. Smirnov. Physics Solid State, **62** (10), 1741 (2020). DOI: 10.1134/S1063783420100029]
- [9] С.А. Атрошенко, С.С. Майер, В.И. Смирнов. ФТТ, **63** (5), 575 (2021). DOI: 10.21883/FTT.2021.05.50803.24
- [10] Л.В. Спивак, Н.Е. Щепина. ЖТФ, **90** (7), 1145 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.07.49449.381-19