

Оригинальная статья

УДК 621.791:625.143.48

DOI: 10.57070/2304-4497-2022-4(42)-92-99

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗОНЕ
СВАРНОГО ШВА РЕЛЬСОВ ТИПА Р65 КАТЕГОРИИ ДТ350**

© 2022 г. Е. В. Полевой¹, М. А. Мартынов¹, С. В. Коновалов², И. И. Чумачков²

¹АО «ЕВРАЗ ЗСМК» (Россия, 654043, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, Космическое ш., 16)

²Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Рельсы являются важнейшим элементом верхнего строения железнодорожного пути. Для повышения плавности хода, снижения динамических нагрузок в местах соединения все большее распространение получает контактная сварка рельсов в плети в стационарных условиях и алюмотермитная сварка непосредственно в пути. Несмотря на повышение качества соединений, зона сварных стыков вследствие изменения структуры, обусловленной физическими процессами сварки и термообработки, является местом с более низкими механическими характеристиками относительно металла цельнокатаных рельсов. Развитие дефектов в сварных стыковых соединениях является одной из основных причин изъятия рельсов из эксплуатации. Важной составляющей обеспечения качества рельсов и сварных стыков является формирование благоприятной эпюры остаточных напряжений. С целью оценки влияния индукционного нагрева и закалки проведено исследование распределения остаточных напряжений до и после термообработки сварного стыка, полнопрофильных проб рельсов типа Р65 категории ДТ350 из стали марки Э76ХФ текущего производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Установлено, что в головке рельса преобладают сжимающие остаточные напряжения как до, так и после термической обработки, подогрев снижает общие напряжения до 210 – 264 МПа, максимальные сжимающие напряжения (586 МПа) фиксируются на стыке после упрочняющей термообработки. В шейке рельса преобладают растягивающие напряжения, отмечено резкое увеличение напряжений после упрочняющей термической обработки: напряжения возросли более чем в три раза (с 68 до 254 МПа). После подогрева сварного стыка наблюдается незначительное снижение остаточных напряжений в этой области. В подошве рельса фиксируются сжимающие напряжения с идентичной эпюрой независимо от термической обработки. Минимальные напряжения фиксируются по центру подошвы с последующим увеличением к краю пера. Наибольшая разница (57 – 537 МПа) зафиксирована после упрочняющей термообработки по периметру подошвы.

Ключевые слова: рельсы, контактная стыковая сварка, сварной стык, болтовой стык, остаточные напряжения, индукционный нагрев, дифференцированная термическая обработка

Для цитирования: Полевой Е.В., Мартынов М.А., Коновалов С.В., Чумачков И.И. Исследование распределения остаточных напряжений в зоне сварного шва рельсов типа Р65 категории ДТ350 // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 4 (42). С. 92 – 99. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-92-99](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-92-99)

Original article

**INVESTIGATION OF THE DISTRIBUTION OF RESIDUAL STRESSES IN THE ZONE
OF THE WELDED SEAM OF RAILS OF THE R65 TYPE OF THE DT350 CATEGORY**

© 2022 E. V. Polevoy¹, M. A. Martynov¹, S. V. Konovalov², I. I. Chumachkov²

¹JSC EVRAZ ZSMK (16 Cosmic highway, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

²Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. Rails are the most important element of the superstructure of the railway track. To increase the smoothness of the ride, reduce dynamic loads at the junctions of the rails, contact welding of rails in a whip in stationary conditions and aluminothermic welding directly on the way are becoming more common. Despite the improvement in the quality of the joints, the zone of welded joints, due to a change in the structure due to the physical processes of welding and heat treatment, is still a place with lower mechanical characteristics compared to the metal of solid-rolled rails. The development of defects in welded butt joints is one of the main reasons for removing rails from service. An important component of ensuring the quality of rails and welded joints is the formation of a favorable diagram of residual stresses. In order to assess the effect of induction heating and hardening, a study was made of the distribution of residual stresses before and after heat treatment of the welded joint, full-profile samples of R65 type rails of the DT350 category of steel grade E76HF, the current production of EVRAZ ZSMK JSC. It has been established that compressive residual stresses predominate in the rail head both before and after heat treatment, heating reduces the overall stress level to the level of 210–264 MPa, the maximum compressive stress level equal to 586 MPa is fixed at joint No. 224, after hardening heat treatment. Tensile stresses predominate in the neck of the rail, a sharp increase in stresses after hardening heat treatment was noted, the stress level increased more than three times, from 68 MPa to 254 MPa. After heating the welded joint, a slight decrease in residual stresses in this area is observed. Compressive stresses are recorded in the rail sole, with identical diagram, regardless of heat treatment. A minimum of stress is fixed in the center of the sole, with a subsequent increase towards the edge of the feather. The greatest difference was recorded after hardening heat treatment, from 57 MPa to 537 MPa, respectively.

Keywords: rails, flash butt welding, welded joint, bolted joint, residual stress, induction heating, differential heat treatment

For citation: Polevoy E.V., Martynov M.A., Konovalov S.V., Chumachkov I.I. Investigation of the distribution of residual runs in the observation zone of a welded seam of rails of the R65 type of category DT350. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022, no. 4 (42), pp. 92 – 99. (In Russ.). [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-92-99](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-92-99)

Введение

В настоящее время развитие железнодорожных перевозок направлено на увеличение грузонапряженности, повышение пропускной и провозной способности [1 – 5]. Реализуется это за счет увеличения скоростей движения и веса подвижного состава, внедрения более мощных локомотивов, более тяжелых инновационных вагонов с повышенными (более 245,17 кН) осевыми нагрузками, что влечет за собой увеличение в процессе эксплуатации нагрузок на железнодорожные рельсы, стыковые и болтовые соединения. Помимо формирующихся под воздействием колес в рельсах контактных и изгибающих напряжений, влияющих на возникновение и развитие дефектов, большую роль в обеспечении срока службы рельсов оказывает величина и эпюра распределения остаточных напряжений, способных вызвать внезапное хрупкое разрушение при развитии усталостных трещин минимального размера [6 – 10].

Сварной стык (по сравнению с болтовым) снижает динамические нагрузки, увеличивает плавность хода, способствует повышению скоростей движения и прочности самого соединения, исключает риски изломов от болтовых отверстий [11 – 14]. Вместе с тем изменения структуры, обусловленные принятыми в настоящее время на рельсосварочных предприятиях технологиями контактной сварки оплавлением и термообработки, не позволяют добиться равнопрочного состояния по сравнению с рельсовым металлом вне

стыка. Об этом свидетельствует высокий выход рельсов (большое количество изъятых рельсов из пути из-за образования в них дефектов в процессе эксплуатации) из эксплуатации по дефектам в сварных стыках, который достигает 26 % от общего объема лежащих в пути и замененных дефектных рельсов, и рельсов с дефектами, представляющими прямую угрозу безопасности движения из-за возможного разрушения под поездом или схода колес с рельса [15, 16]. Для сварного стыка, в котором перераспределение остаточных напряжений в силу технологических особенностей процесса сварки и термообработки происходит более интенсивно и в большей степени влияет на эксплуатационную стойкость, решение вопросов формирования благоприятной эпюры остаточных напряжений является наиболее актуальным.

В настоящее время перед отечественными и зарубежными производителями стоит задача разработки перспективных режимов сварки и термообработки рельсов, обеспечивающих не только отсутствие дефектов и соответствие сварного соединения требованиям нормативно-технической документации, но и формирование благоприятной эпюры остаточных напряжений в зоне сварного стыка.

Целью настоящей работы является исследование влияния термической обработки на перераспределение остаточных напряжений в зоне сварного стыка как одного из факторов, влияющих на эксплуатационную стойкость сварного соединения.

Режимы сварки
Table 1. Welding modes

Оплавление пульсирующее										
Участок	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S , мм	2,5	4,0	3,8	3,4	3,4	3,2	2,0	2,0	1,5	1,5
U , %	99	99	75	75	75	75	99	99	99	99
V_B , мм/с	1,0	1,2	0,8	1,0	1,2	1,4	1,0	1,2	1,4	1,6
V_H , мм/с	0,7	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,3
Параметры корректора скорости по току										
Участок	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_{кор}$, А	220	280	200	250	300	400	450	550	650	750
$I_{ост}$, А	320	380	300	350	400	500	550	700	800	900
$I_{рев}$, А	380	440	350	400	450	550	650	800	900	1000
$I_{кз}$, А	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1400	1400	1400	1400

Примечание: Осадка 16 мм, осадка под током 9 мм. $I_{кор}$ – ток коррекции; $I_{ост}$ – ток остановки подачи; $I_{рев}$ – ток реверса; $I_{кз}$ – ток короткого замыкания.

Материал и методика исследования

Исследовали сварные стыковые соединения, изготовленные из образцов, отобранных от рельса типа Р65 категории ДТ350 из стали марки Э76ХФ текущего производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Стыковые соединения условно замаркированы 1, 2, 3. Сварку стыков проводили на машине контактной стыковой сварки МСР 63.01А рельсоварочной лаборатории АО «ЕВРАЗ ЗСМК», режим представлен в табл. 1. Параметры режима сварки соответствуют требованиям ТУ 24.10.75-369-01124323 – 2019, приложение № 5 [17].

С целью исследования характера распределения остаточных напряжений в зоне сварного шва после сварки, а также влияния термической обработки на изменение эпюры остаточных напряжений стыковое соединение 1 исследовали в состоянии после сварки, сварные стыки 2 и 3 подвергали термической обработке на установке индукционного нагрева УИН 001-100/РТ-С(М) по режимам, представленным в табл. 2.

Сварной стык 3 подвергали «классической» термообработке по принятой на рельсовароч-

ных предприятиях технологии с нагревом токами высокой частоты [18] металла в зоне сварного шва до температур выше точки полиморфного превращения, выдержкой и ускоренным охлаждением.

Сварной стык 2 после сварки подвергали отпуску для снятия напряжений, включающим нагрев до 550 °С, выдержку в течение 240 с и охлаждение на воздухе.

Остаточные напряжения определяли тензометрическим методом согласно требований п. 7.23 ГОСТ Р 51685 – 2013 [19] с монтажом дополнительных датчиков по периметру образца. Данный метод основан на измерении упругих деформаций, возникающих на поверхности темплета при вырезке его из рельса.

Следует отметить, что в соответствии с отечественной [19] и зарубежной [20] нормативной документацией контроль остаточных напряжений рельсов проводится в зоне средней трети подошвы, а касательно сварных стыков не регламентирован и не применяется как критерий качества при производстве рельсовой плети.

Режимы термической обработки
Table 2. Heat treatment modes

Стык	Категория	Марка стали	$t_{нач}$, °С	Параметры термообработки				
				$t_{наг}$, °С	$T_{наг}$, с	$T_{выд}$, с	$T_{охл}$, с	$t_{кон}$, °С
2	ДТ350	Э76ХФ	20	550	10	240	–	–
3	ДТ350	Э76ХФ	20	950	40	180	280	320

Примечание: $t_{нач}$ – начальная температура пробы; $t_{наг}$ – температура нагрева; $T_{наг}$, $T_{выд}$ и $T_{охл}$ – время нагрева, выдержки и охлаждения; $t_{кон}$ – температура конца термической обработки.

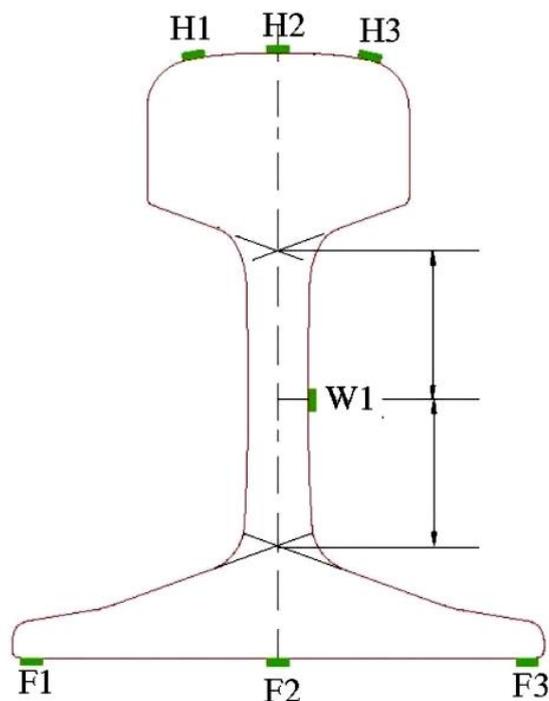


Рис. 1. Схема расположения тензорезисторов
Fig. 1. Strain gauge layout

Измерения остаточных напряжений в головке, шейке и подошве рельсов по линии сварного стыка проводили с применением измерительного усилителя Spider 8 и с использованием тензорезисторов марки FLA-3-11-1LJC (производство фирмы Tokyo Measuring Instruments Lab.), с принятым модулем упругости $2,07 \cdot 10^5$ МПа.

В исследуемом сечении (ось сварного шва) на поверхность сварного стыка вдоль продольной оси стыков наклеивали семь тензорезисторов в соответствии со схемой (рис. 1):

- три датчика монтировали на поверхности катания головки: по вертикальной оси симметрии (датчик H2) и на расстоянии 20 мм в сторону левой и правой выкружек (датчики H1 и H3 соответственно);

- один датчик (W1) монтировали в центральной части шейки;

- три датчика монтировали на поверхности основания подошвы: по вертикальной оси симметрии (датчик F2) и на расстоянии 55 мм в сторону левой и правой боковых граней пера подошвы (датчики F1 и F3 соответственно).

После наклейки тензорезисторов и сушки измеряли начальные показания, полученные значения заносили в таблицу. Далее из рельсовой пробы вырезали темплет толщиной 20 ± 1 мм с тензорезисторами, после чего проводили повторные замеры. По разнице значений (с учетом модуля упругости) определяли величины продольных остаточных напряжений.

Результаты исследования

Результаты измерения остаточных напряжений приведены в табл. 3 (знак « \leftarrow » перед значением свидетельствует о наличии сжимающих остаточных напряжений, « \rightarrow » – растягивающих).

Т а б л и ц а 3

Результаты измерения остаточных напряжений
Table 3. Residual stress measurement results

Тензорезистор	Напряжения, МПа, в стыке			Координаты расположения, мм
	1 (без ТО)	2 (ТО)	2 (подогрев)	
H1 (головка)	-417	-586	-264	17
H2 (головка)	-363	-417	-223	37
H3 (головка)	-438	-568	-210	57
W1 (шейка)	+68	+254	+59	95
F1 (подошва)	-464	-535	-433	20
F2 (подошва)	-228	-57	-181	75
F3 (подошва)	-574	-518	-426	130

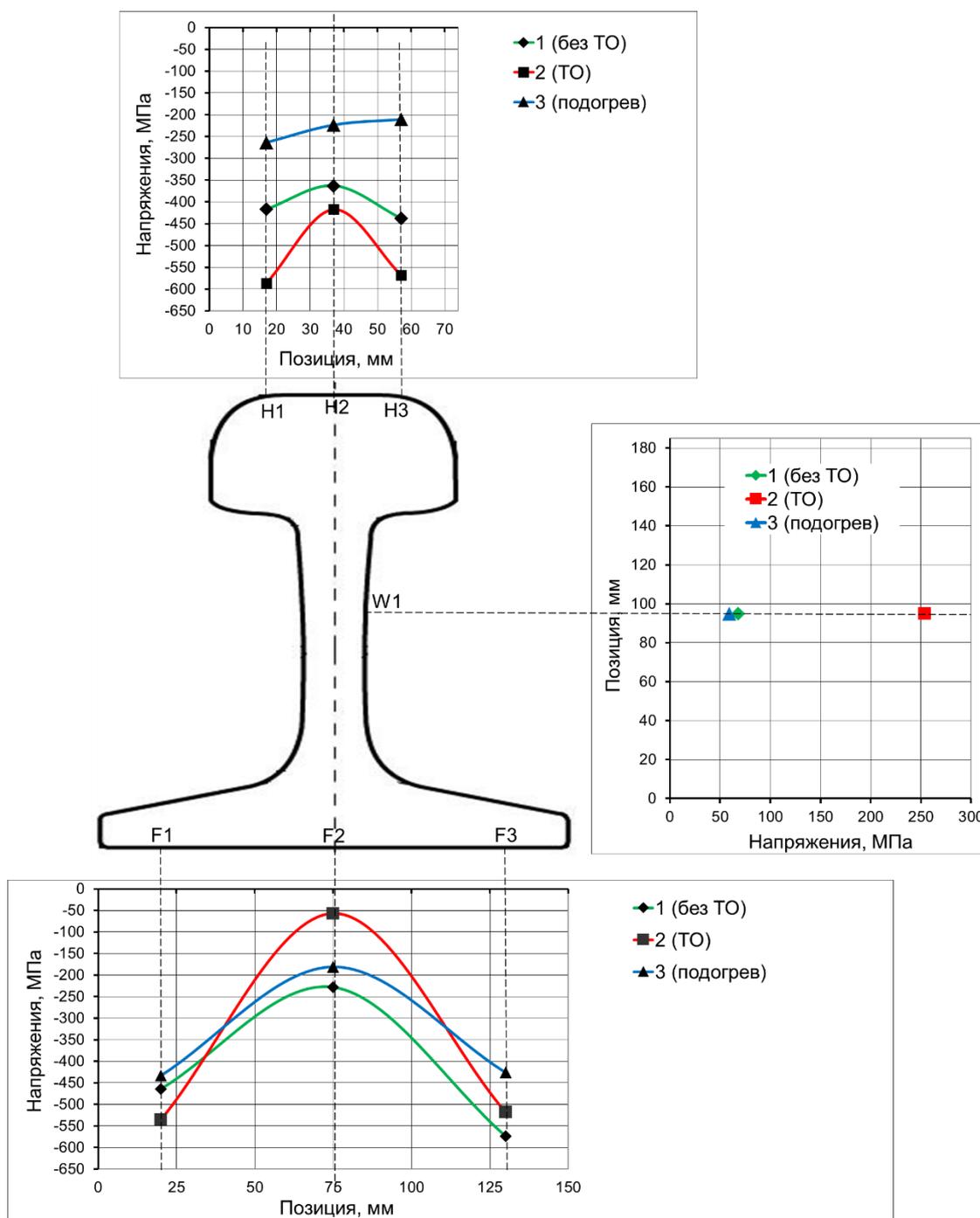


Рис. 2. Эпюры распределения остаточных напряжений по режимам 1 – 3

Fig. 2. Residual stress distribution diagrams по режимам 1 – 3

Эпюры остаточных напряжений сварного стыка без термообработки и после термообработки по двум режимам на УИН представлены на рис. 2. Для всех образцов в головке и подошве рельсов преобладают сжимающие напряжения, в шейке – растягивающие. Наиболее высокие остаточные напряжения в головке рельсов (от 417 до 586 МПа) наблюдаются в пробах, подвергнутых термообработке по стандартной технологии, наименьшие (от 210 до 264 МПа) – при подогреве сварного стыка до 550 °С. В стыках после сварки

(без термообработки) остаточные напряжения в головке составили 363 – 438 МПа.

В шейке рельса (позиция W1) остаточные напряжения для стыка 1 в состоянии после сварки (без термообработки) и стыка 3, нагретого до 550 °С, находятся на сопоставимом уровне: +68 и +59 МПа соответственно. Остаточные напряжения в шейке стыка после термообработки по классической технологии (проба 2) составили +254 МПа, что более чем в три раза выше относительно остаточных напряжений стыков 1 и 3.

Распределения остаточных напряжений в подошве рельса исследуемых сварных стыков имеет схожий характер: с увеличением значений от центра подошвы к краю пера. Наиболее ярко выражено изменение остаточных напряжений на пробе 2 после термообработки по классическому режиму: в центре подошвы сжимающие напряжения снизились до 59 МПа, при этом сжимающие напряжения по краям пера подошвы составляют 510 – 535 МПа, что может отрицательно влиять на усталостную прочность сварного стыка в процессе эксплуатации.

Подогрев сварного стыка до 550 °С (стык 3) снижает напряжения относительно сварного стыка без термообработки, наиболее значительное снижение напряжений наблюдается на поверхности катания головки.

Выводы

Проведенные исследования сварных стыков рельсов типа Р65 категории ДТ350 из стали марки Э76ХФ показали, что в головке и подошве сварных стыков по месту сварного шва образуются сжимающие остаточные напряжения, в шейке – растягивающие. Термообработка рельсов по классической технологии приводит к существенному снижению напряжений по центру подошвы и наиболее значительному перепаду значений напряжений между центром и боковыми гранями, наиболее высоким сжимающим остаточным напряжениям в головке и растягивающим в шейке.

Подогрев сварного стыка до 550 °С приводит к небольшому снижению остаточных напряжений по сравнению с состоянием непосредственно после сварки (без термообработки). В целом эпоэра остаточных напряжений с превалированием сжимающих напряжений должна оказывать благоприятное влияние на усталостную прочность стыка в процессе эксплуатации.

Для всесторонней оценки влияния термообработки на качественные характеристики и потребительские свойства стыка требуется проведение дополнительных исследований микроструктуры, механических свойств и твердости, статических испытаний на трехточечный изгиб, а также проведение циклических испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Старовойтов М.М., Ваганова О.Н. Ключевые ориентиры развития путевого комплекса // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 12. С. 2–4.
2. Jing G., Siahkouhi M., Edwards J.R., Dersch M.S., Hoult N.A. Smart railway sleepers – a review of recent developments, challenges, and future prospects // Construction and Building Materials. 2021. No. 271. P. 776–778. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121533>
3. Akkerman G.L., Skutina M.A. Control over transverse shifts of rail sleeper lattice which impact on deformation of ballast layer // Procedia Engineering. 2017. No. 189. P. 181–185. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.029>
4. Godefroid L.B., Faria G.L., Cândido L.C., Viana T.G. Failure analysis of recurrent cases of fatigue fracture in flash butt welded rails // Engineering Failure Analysis. 2015. No. 58 (2). P. 407–416. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.05.022>
5. Jihua L., Peng C., Yangting O., Guiyuan Z., Pijie Y., Zhibiao X., Yongjian L., Peng L., Chenggang H., Xin D., Yujun Z. Study on wear and rolling contact damage mechanism between quenched U75V rail and wheels with different microstructures // Wear. 2023. No. 512-513. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204544>
6. Brennan L., Gedney, Dimitrios C., Rizos. Combining welding-induced residual stress with thermal and mechanical stress in continuous welded rail // Results in Engineering. 2022. No. 16. C. 1–95. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100777>
7. Xiu-Yang F., Hao-Nan Z., Dong-Wen M., Ze-Jian W., Wei H. Influence of welding residual stress on subsurface fatigue crack propagation of rail // Engineering Fracture Mechanics. 2022. No. 271. Article 108642. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108642>.
8. Yang L., Kin S.T., Nellian A.S., John Hock L.P. Structural fatigue investigation of thermite welded rail joints considering weld-induced residual stress and stress relaxation by cyclic load // Engineering Structures. 2021. No. 235. Article 112033. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112033>
9. Ninshu M., Zhipeng C., Hui H., Dean D., Murakawa H., Jiluan P. Investigation of welding residual stress in flash-butt joint of U71Mn rail steel by numerical simulation and experiment // Materials & Design. 2015. No. 88. P. 1296–1309. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.124>
10. Ghazanfari M., Tehrani P. H. Increasing fatigue crack initiation life in butt-welded UIC60 rail by optimization of welding process parameters // International Journal of Fatigue. 2021. No. 151. Article 106367. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106367>
11. Крейнис З.Л., Селезнева Н.Е. Бесстыковой путь. Устройство, техническое обслуживание, ремонт. Москва: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2012. 472 с.
12. Zerbst U., Lundén R., Edel K.-O., Smith R.A. Introduction to the damage tolerance behaviour of railway rails – a review // Engineering Fracture

- Mechanics. 2009. Vol. 76. No. 17. P. 2563–2601. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2009.09.003>
13. Hang S., Chung L. P., Peter M., Qianhua K., Guozheng K., Wenyi Y. Numerical study on the ratcheting performance of rail flash butt welds in heavy haul operations // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2021. No. 199. Article 106434. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106434>
 14. Mubarak C. K. A., Upadhyay A. Stability of continuous welded rail on steel bridge subjected to thermal loading // *Structures*. 2021. No. 34. P. 4524–4531. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.10.050>
 15. Залива Д.В. Влияние эксплуатационных, технических и технологических факторов на образование дефектов рельсов и мероприятия по снижению их воздействия. В кн.: Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений. Сборник научных докладов. Екатеринбург: ОАО «УИМ», 2022. С. 95–109.
 16. Bauri L.F., Alves L.H.D., Pereira H.B., Tschiptschin A.P., Goldenstein H. The role of welding parameters on the control of the microstructure and mechanical properties of rails welded using FBW // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9. No. 4. P. 8058–8073. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.030>
 17. ТУ 24.10.75-369-01124323 – 2019 «Рельсы железнодорожные, сваренные электроконтактным способом». Введ. 1 января 2021 г. Москва: ОАО «РЖД», 2021. 40 с.
 18. Шур Е.А. Повреждения рельсов. Москва: Интекст, 2012. 192 с.
 19. ГОСТ Р 51685 – 2013 Рельсы железнодорожные. Общие технические условия. Введ. 14 октября 2013. Москва: Стандартинформ, 2014. 95 с.
 20. DIN EN 13674-1:2017. Железные дороги. Верхнее строение пути. Рельсы. Часть 1. Рельсы Виньоля 46 кг/м и более. Технический комитет (CEN/TC 256) «Железные дороги» (секретариат DIN, Германия). Европейский комитет по железным дорогам (CEN). 2017. 113 с.
- #### REFERENCES
1. Starovoitov M.M., Vaganova O.N. Key guidelines for the development of the travel complex. *Put' i putevoe khozyaistvo*. 2021, no. 12, pp. 2–4. (In Russ.)
 2. Jing G., Siahkouhi M., Edwards J. R., Dersch M. S. Hoult N.A. Smart railway sleepers – a review of recent developments, challenges, and future prospects. *Construction and Building Materials*. 2021, no. 271, pp. 776–778. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121533>
 3. Akkerman G.L. Skutina M.A. Control over transverse shifts of rail sleeper lattice which impact on deformation of ballast layer. *Procedia Engineering*. 2017, no. 189, pp. 181–185. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.029>
 4. Godefroid L.B., Faria G.L., Cândido L.C., Viana T.G. Failure analysis of recurrent cases of fatigue fracture in flash butt welded rails. *Engineering Failure Analysis*. 2015, no. 58 (2), pp. 407–416. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.05.022>
 5. Jihua L., Peng C., Yangting O., Guiyuan Z., Pijie Y., Zhibiao X., Yongjian L., Peng L., Chenggang H., Xin D., Yujun Z. Study on wear and rolling contact damage mechanism between quenched U75V rail and wheels with different microstructures. *Wear*. 2023, no. 512–513, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204544>
 6. Brennan L. Gedney, Dimitrios C. Rizos. Combining welding-induced residual stress with thermal and mechanical stress in continuous welded rail. *Results in Engineering*. 2022, no. 16, pp. 1–95. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100777>
 7. Xiu-Yang F., Hao-Nan Z., Dong-Wen M., Ze-Jian W., Wei H. Influence of welding residual stress on subsurface fatigue crack propagation of rail. *Engineering Fracture Mechanics*. 2022, no. 271, article 108642. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108642>
 8. Yang L., Kin S.T., Nellian A.S., John Hock L.P. Structural fatigue investigation of thermite welded rail joints considering weld-induced residual stress and stress relaxation by cyclic load. *Engineering Structures*. 2021, no. 235, article 112033. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112033>
 9. Ninshu M., Zhipeng C., Hui H., Dean D., Murakawa H., Jiluan P. Investigation of welding residual stress in flash-butt joint of U71Mn rail steel by numerical simulation and experiment. *Materials & Design*. 2015, no. 88, pp. 1296–1309. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.124>
 10. Ghazanfari M., Tehrani P.H. Increasing fatigue crack initiation life in butt-welded UIC60 rail by optimization of welding process parameters. *International Journal of Fatigue*. 2021, no. 151, article 106367. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106367>
 11. Kreinis Z.L., Selezneva N.E. *Besstykovoi put'. Ustroistvo, tekhnicheskoe obsluzhivanie, remont*. Moscow: Uchebno-metodicheskii tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte, 2012, 472 p. (In Russ.)

12. Zerbst U., Lundén R., Edel K.-O., Smith R.A. Introduction to the damage tolerance behaviour of railway rails – a review. *Engineering Fracture Mechanics*. 2009, vol. 76, no. 17, pp. 2563–2601. <https://doi.org/10.1016/j.engfrac.mech.2009.09.003>
13. Hang S., Chung L. P., Peter M., Qianhua K., Guozheng K., Wenyi Y. Numerical study on the ratcheting performance of rail flash butt welds in heavy haul operations. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2021, no. 199, article 106434. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106434>
14. Mubarack C. K. A., Upadhyay A. Stability of continuous welded rail on steel bridge subjected to thermal loading. *Structures*. 2021, no. 34, pp. 4524–4531. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.10.050>
15. Zaliva D.V. The influence of operational, technical and technological factors on the formation of rail defects and measures to reduce their impact. In: *Improving the quality and operating conditions of rails and rail fasteners. Collection of scientific reports. Yekaterinburg: JSC "UIM". 2022, pp. 95–109. (In Russ.)*.
16. Bauri L.F., Alves L.H.D., Pereira H.B., Tschiptschin A.P., Goldenstein H. The role of welding parameters on the control of the microstructure and mechanical properties of rails welded using FBW. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020, vol. 9, no. 4, pp. 8058–8073. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.030>
17. TU 24.10.75-369-01124323 – 2019 "Railway rails welded by electric contact method". Introduction. January 1, 2021. Moscow: JSC "Russian Railways", 2021, 40 p. (In Russ.).
18. Shur E.A. *Rail damage*. Moscow: Intext, 2012, 192 p. (In Russ.).
19. GOST R 51685 – 2013 *Railway rails. General technical conditions. Introduction*. October 14, 2013. Moscow: Standartinform, 2014, 95 p. (In Russ.).
20. DIN EN 13674-1:2017. *Railways. The upper structure of the path*. Rails. Part 1. Vignole rails 46 kg/m and more. Technical Committee (CEN/TC 256) "Railways" (DIN secretariat, Germany). European Committee on Railways (CEN). 2017, 113 p. (In Russ.).

Сведения об авторах

Егор Владимирович Полевой, к.т.н., начальник отдела, АО «ЕВРАЗ ЗСМК»
E-mail: Egor.Polevoj@evraz.com
ORCID: 0000-0001-9025-5442

Михаил Александрович Мартынов, главный специалист по сварке, АО «ЕВРАЗ ЗСМК»
E-mail: Mikhail.Martynov@evraz.com
ORCID: 0000-0001-9901-6384

Сергей Валерьевич Коновалов, д.т.н., профессор кафедры механики и машиностроения, проректор по научной и инновационной деятельности, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: konovalov@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0003-4809-8660

Илья Игоревич Чумачков, аспирант кафедры механики и машиностроения, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: I.I.Chumachkov@yandex.ru
ORCID: 0000-0003-4721-6821

Information about the authors

Egor V. Polevoy, Cand. Sci. (Eng.), Head of Department, JSC EVRAZ ZSMK
E-mail: Egor.Polevoj@evraz.com
ORCID: 0000-0001-9025-5442

Mikhail A. Martynov, Chief Welding Specialist, JSC EVRAZ ZSMK
E-mail: Mikhail.Martynov@evraz.com
ORCID: 0000-0001-9901-6384

Sergey V. Konovalov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Mechanics and Mechanical Engineering, Vice-Rector for Research and Innovation, Siberian State Industrial University
E-mail: konovalov@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0003-4809-8660

Ilya I. Chumachkov, postgraduate student of the Department of Mechanics and Mechanical Engineering, Siberian State Industrial University
E-mail: I.I.Chumachkov@yandex.ru
ORCID: 0000-0003-4721-6821

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 16.11.2022
 После доработки 24.11.2022
 Принята к публикации 25.11.2022

Received 16.11.2022

Revised 24.11.2022

Accepted 25.11.2022