

Металловедение и термическая обработка

УДК 669-1:620.179.186.192

DOI: 10.14529/met210103

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РЕЛЬСОВ Р65 ИЗ СТАЛИ К76Ф СОВРЕМЕННЫМИ СПОСОБАМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Н.Т. Карева, М.В. Судариков, П.А. Сивков

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Неразрушающий контроль рельсов – один из важнейших этапов производства, потому что он позволяет наиболее объективно определить, соответствуют ли рельсы, изготовленные по определенному технологическому процессу, необходимым требованиям. Способность выдерживать постоянные ударные нагрузки является одним из важных параметров, характеризующих долговечность эксплуатации рельсов, особенно при отрицательных температурах. Данная характеристика зависит от многих факторов, среди которых размер и характер распределения неметаллических включений, размер зерна, наличие упрочняющих частиц, равномерность их распределения и многое другое. Незарушающие методы исследования проводятся сплошным контролем по всему сечению каждого рельса непосредственно при их производстве для предотвращения контактно-усталостных трещин и других дефектов при их эксплуатации, которые могут спровоцировать нарушение работы железнодорожного транспорта.

Задачи по совершенствованию процесса выявления брака неразрушающими методами контроля остаются актуальными из-за множества воздействующих на них факторов или даже комплекса факторов.

В настоящей работе представлены результаты оценки внутренних металлургических дефектов, обнаруженных с помощью неразрушающей ультразвуковой дефектоскопии в процессе производства рельсов Р65, изготовленных из стали К76Ф. Проведено электронно-микроскопическое исследование химического состава, структуры, размеров, формы, характера распределения выявленных дефектов. Они представляют собой сложные алюмосиликаты, сульфиды, окаймленные карбидами титана и ванадия, а также вкатанную при прокатке окалину.

Дефекты выявлены главным образом в шейке рельсов. Это неметаллические включения, сформировавшиеся в стали при выплавке, раскислении, разливке и прокатке. Условия кристаллизации непрерывно литой заготовки способствуют образованию неметаллических включений преимущественно в ее центре, из которого при последующей прокатке формируется шейка рельса.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, рельсовая сталь К76Ф, неметаллические включения, контактно-усталостная прочность.

Введение

Российские железные дороги – одни из самых протяженных и тяжело нагруженных дорог в мире. Надежность и безопасность их работы обеспечивается в основном качеством рельсов, своевременным обнаружением дефектов верхнего строения пути, ремонтом и восстановлением. Ремонт каждого километра пути обходится ОАО РЖД в 7 млн руб., из них ~4 млн руб. затрачивается на ремонт рельсов. На проведение диагностики рельсового хозяйства ежегодно РЖД расходует ~4 млрд руб. Каждый километр рельсового пути проверяется 13,5 раз в году. В штате дефектоскопистов состоит более 9,1 тыс. чело-

век [1, 2]. Сокращение этих затрат в первую очередь требует улучшения металлургического качества поставляемых отечественных рельсов: совершенствование профиля рельсов, технологии выплавки и разливки рельсовой стали, увеличение длины рельсов, позволяющее сократить количество стыков, использование термического упрочнения с помощью дифференцированной закалки [3–5]. Наличие стыков приводит к появлению ударных нагрузок. Скольжение, пластическая деформация поверхности приводят к нагреву поверхности катания рельса выше критических точек и закалке поверхностного слоя глубиной до 30–50 мкм из-за быстрого отвода

Таблица 1

Размер зерна аустенита и межпластинчатое расстояние
в сорбите закалки в рельсах разных производителей

Производитель рельсов	Размер зерна аустенита, мкм	Межпластинчатое расстояние в сорбите, нм
Евраз	13,2	200
ПАО «ЧМК» Мечел	18,2	152
Япония	18,0	140
Австрия	35,4	–
США	18,6	250

Таблица 2

Критический размер усталостной трещины

Производитель рельсов	Размер критической трещины, мм
Евраз ЗСМК	4,0–7,0
ПАО «ЧМК» Мечел	3,2–7,0
Япония	6,0–9,0
Австрия	2,0–4,0
США	5,9–12,4

тепла вглубь металла с образованием мартенситно-карбидного слоя [6]. Высокая твердость и хрупкость этого слоя вызывает его отслаивание, приводит к увеличению износа рельсов. Интенсивность развития особо опасных поперечных усталостных трещин в головке рельсов оказывает наибольшее влияние на живучесть рельсов [5, 7].

С помощью дифференцированной закалки с прокатного нагрева в рельсе базовой категории, например, ДТ350 (дифференцированно-упрочненные рельсы с твердостью 361–401 НВ, ГОСТ Р 51685–2013), можно сформировать мелкозернистую однородную аустенитную структуру (~ 18–13 мкм, табл. 1), превращающуюся затем при охлаждении в тонкодисперсный пластинчатый сорбит (~ 150–200 нм, табл. 1) [8–10].

Увеличение степени дисперсности структуры обеспечивает более высокие характеристики сопротивления контактной усталости, в частности уменьшаются критические размеры усталостных трещин. Причем критический размер усталостной трещины рельсов ДТ 350 отечественного производства сопоставим с аналогичной характеристикой для рельсов ведущих зарубежных производителей (табл. 2) [2].

Дифференцированная закалка рельсов приводит также к уменьшению их коробления в 4,3 раза: от 1,3 мм на 1 м длины объемно-закаленного рельса до 0,3 мм [2].

Для оценки качества рельсов Р65 широко применяются различные виды неразрушаю-

щего контроля, которые позволяют выявлять следующие дефекты и недопустимые отклонения:

– внутренние несплошности в головке, шейке и средней части подошвы рельса (неметаллические включения, трещины, закаты при прокатке заготовок);

– дефекты поверхности катания головки и основания подошвы (подповерхностные трещины, царапины);

– отклонения от прямолинейности рельсов в вертикальной и горизонтальной плоскостях;

– отклонение от формы рельсов в поперечном сечении (разнотолщинность, ромбичность квадрата и т. д.) [8–11].

Материал и методика исследования

Объект исследования – рельсы Р65 производства ПАО «ЧМК» из стали марки К76Ф, выплавленной в конверторе. Цифра 65 указывает массу одного метра рельса в килограммах. Состав рельсовой стали приведен в табл. 3.

Полученные на машине непрерывного литья заготовки прокатывались на рельсобалочном стане. Готовые рельсы подвергались дифференцированной закалке с температуры прокатного нагрева и правке. Они прошли контроль на ультразвуковых установках СОНОТРОН ЕМАТ–880 (метод А), СОНОТРОН/24 (метод Б), выявляющих несплошности размерами от 50 мм и 2 мм соответственно [10, 11]. При превышении на де-

Химический состав стали К76Ф (масс. %) [3]

C	Mn	Si	Cr	N	V	P	S	Al
						не более		
0,71–0,82	0,75–1,25	0,2–0,6	не более 0,20	–	0,03–0,15	0,020	0,020	0,004

Массовая доля остаточных элементов в стали не должна превышать: суммарная меди и никеля – 0,27 %; титана – 0,010 % [3].

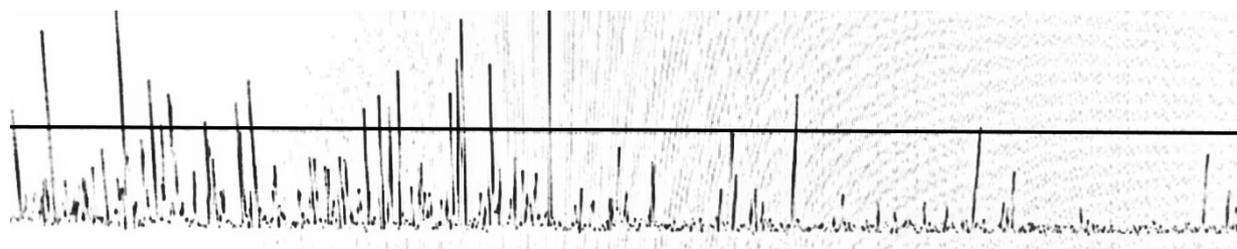


Рис. 1. Дефектограмма шейки рельса Р65, полученная методом Б (станция СОНОТРОН/24)

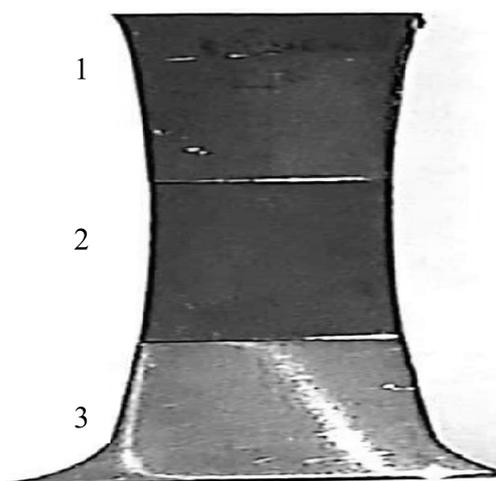


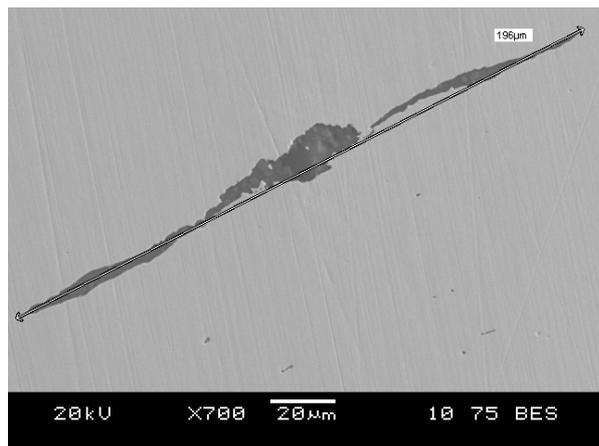
Рис. 2. Схема вырезки образцов в дефектной шейке рельса: № 1 – вблизи головки рельса, № 2 – средняя часть шейки, № 3 – нижняя часть вблизи подошвы рельса

фектограмме амплитуды отраженного сигнала более 50 % экрана сканирования (т. е. выше горизонтали на рис. 1), в рельсе фиксировалось место залегания дефекта, где затем отбиралась проба для более детального изучения. Проба разрезалась на образцы (рис. 2), которые шлифовались, полировались и травились в 4%-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте. Поверхность образцов изучалась с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6460LV, снабженного энергодисперсионным анализатором фирмы Oxford Instruments для проведения микро-рентгеноспектрального анализа. При этом оценивались форма, размеры, характер рас-

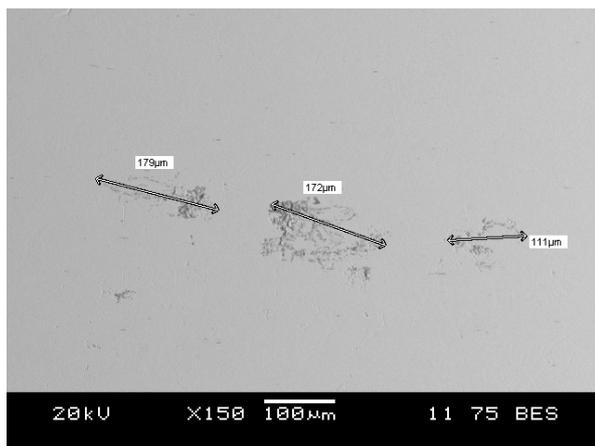
пределения неметаллических включений и их химический состав.

Обсуждение результатов

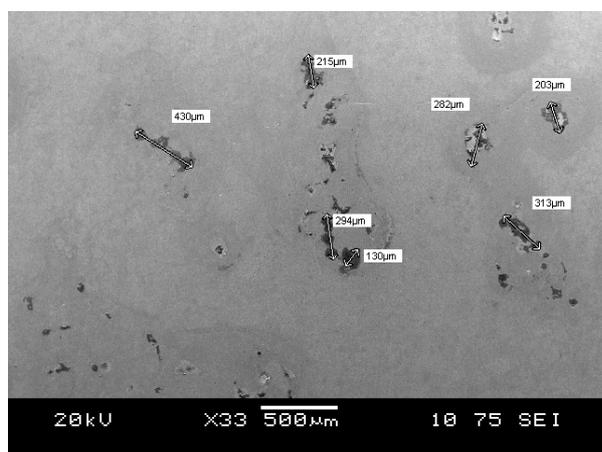
Согласно полученным электронно-микроскопическим данным дефекты шейки рельса, выявленные ранее методом ультразвукового контроля, представлены вытянутыми строчками (рис. 3а, образец № 1); цепочкой строчек размером от 100 до 200 мкм (рис. 3б, образец № 2); разорванными участками включений размером от 130 до 430 мкм (рис. 3в, г, образец № 3); а также массивными образованиями размером до 1 мм (рис. 3д, образец № 1).



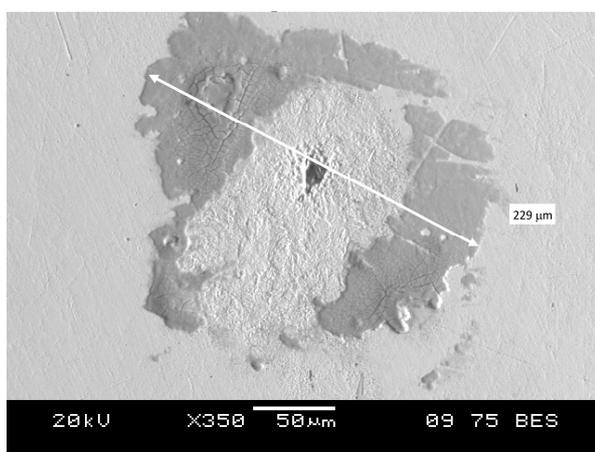
а)



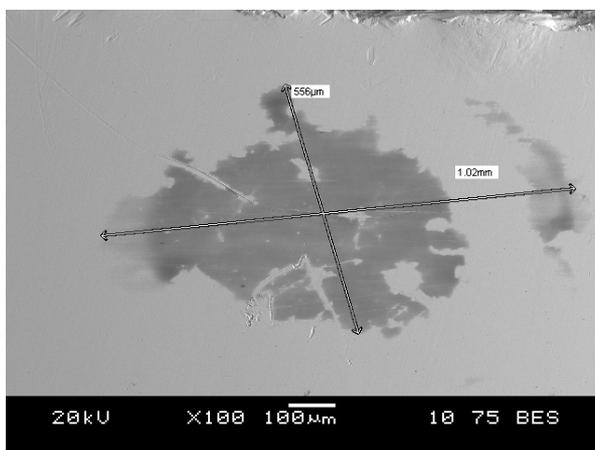
б)



в)



г)



д)

Рис. 3. Формы и размеры неметаллических включений в образцах: № 1 (а, д); № 2 (б); № 3 (в, г)

Эти дефекты состоят из неметаллических включений разной природы даже в пределах одного выделения. Так, в строчке образца № 1 разные ее участки, отмеченные светлым перекрестием и прямоугольником на рис. 4, с которых набирался рентгеновский спектр для количественного определе-

ния элементного состава, образованы сложными оксидами и алюмосиликатами. Их валовой состав, рассчитанный программой обработки спектра INCA Energy, приведен в табл. 4.

В средней части шейки рельса (образец № 2) встречаются аналогичные включения, а

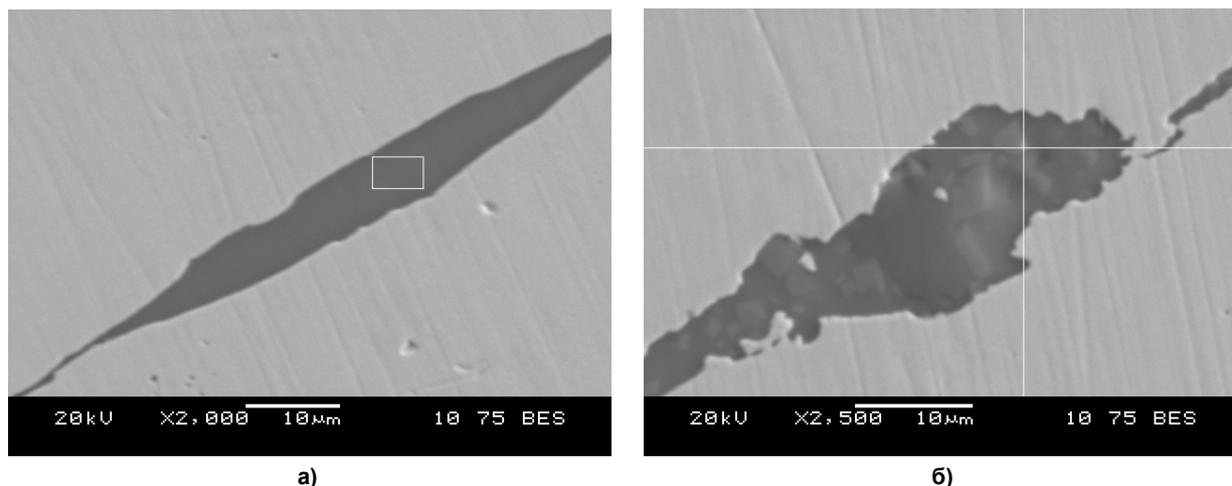


Рис. 4. Участки микрорентгеноспектрального анализа химического состава дефекта шейки рельса (образец № 1): а – место набора спектра 1; б – место набора спектра 2

Таблица 4

Химический состав участков неметаллических включений в образцах шейки дефектного рельса Р65, масс. %

Образец № 1														
№ спектра	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Zr		
1	39,36	5,71	0,99	12,21	22,01	0,38	0,38	0,38	0,38	1,78	3,92	–		
2	39,53	1,96	1,19	20,01	19,60	0,30	0,58	2,07	1,02	11,37	1,70	0,68		
Образец № 2														
	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	V	Mn	Fe	Zr
3	3,63	–	–	–	–	–	14,47	–	–	0,61	1,29	33,62	46,38	–
4	–	32,95	0,41	0,73	9,00	14,90	–	0,55	1,31	2,60	–	15,59	13,58	8,38
Образец № 3														
	O		Si			S		Mn		Fe				
5	31,19		0,37			–		–		62,84				
6	–		–			32,12		62,40		5,48				

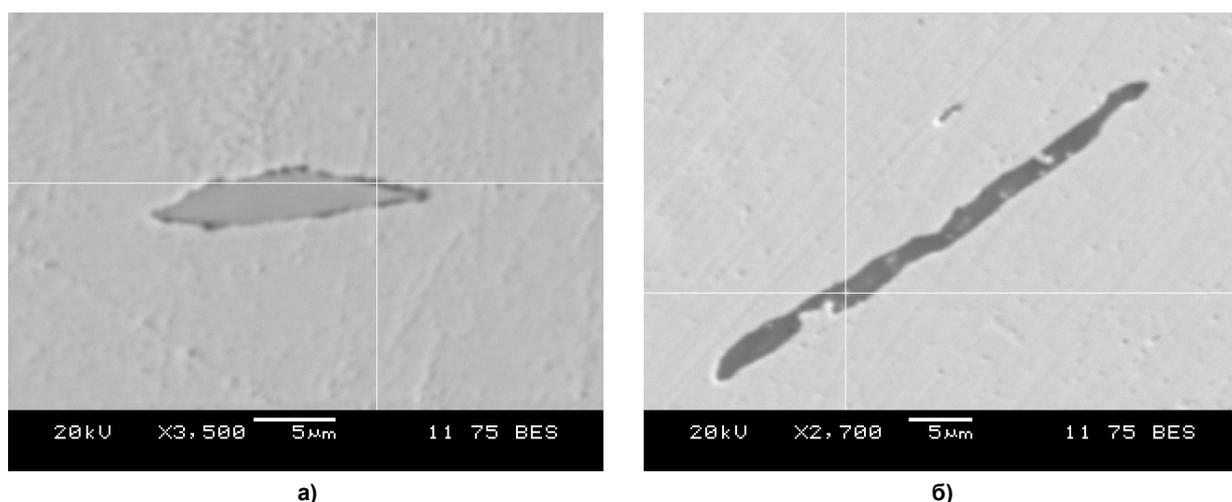


Рис. 5. Участки микрорентгеноспектрального анализа химического состава дефекта шейки рельса (образец № 2): а – место набора спектра 3; б – место набора спектра 4

также вытянутые сульфиды марганца, окаймленные карбидами Ti и V (темные частицы на границе сульфида) (рис. 5, табл. 4).

В образце № 3 (ближе к подошве рельса)

выявляются массивные области оксидов железа с четкой выраженной зернистой структурой и микротрещинами (рис. 6а). В поле оксидов часто располагаются сульфиды марганца

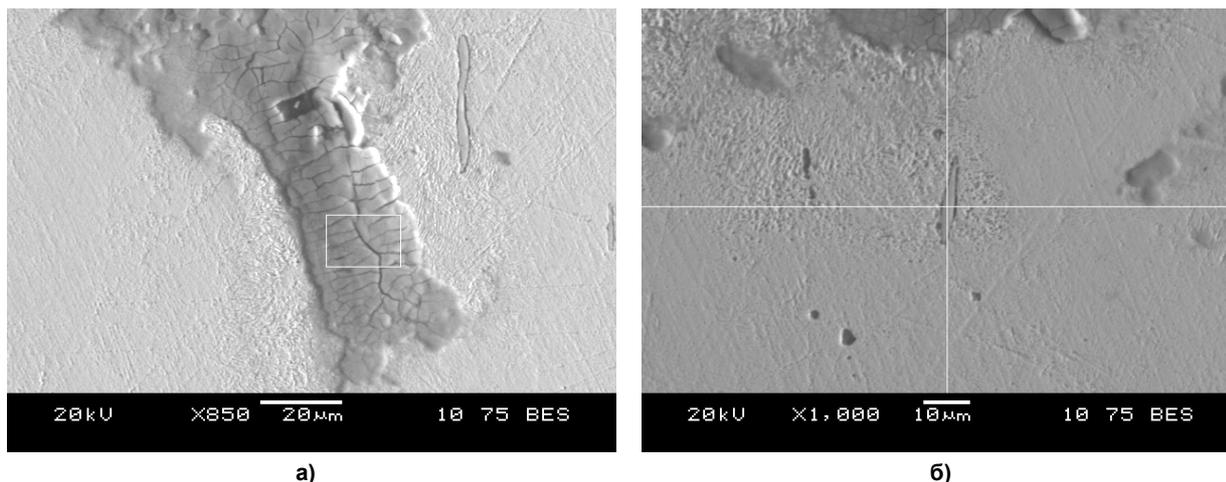


Рис. 6. Участки микрорентгеноспектрального анализа химического состава дефекта шейки рельса (образец № 3): а – место набора спектра 5; б – место набора спектра 6

ца, по краям которых распределены карбидные фазы (рис. 6б, табл. 4).

Наиболее опасными с точки зрения контактно-усталостных разрушений рельсов являются строчки твердых труднодеформируемых высокоглиноземистых оксидных включений с содержанием Al_2O_3 более 50 % [12]. Согласно [13] эти частицы способствуют развитию сдвиговых напряжений в матрице, существенно понижающих жизненный ресурс эксплуатируемых рельсов. В данной работе в шейке дефектных рельсов такие включения обнаруживались. Их размеры невелики, но они встречаются в виде скоплений, величина которых становится достаточной для реагирования ультразвукового датчика.

Дефектограммы шейки рельса с недопустимым превышением амплитуды отраженного звукового сигнала фиксировались примерно в 80 % случаев всех отбракованных ультразвуковым контролем рельсов. Условия кристаллизации непрерывно литой заготовки сечением 300×360 мм способствуют образованию неметаллических включений преимущественно в ее центре, из которого при последующей прокатке и формируется шейка рельса.

При эксплуатации рельсов может наблюдаться их разрушение из-за расслоений

в шейке (в классификаторе дефектов это 5-я группа [10]). Однако, как показывают длительная эксплуатация рельсов и полигонные испытания на экспериментальном кольце ВНИИЖТ, основную массу рельсов изымают по причине контактно-усталостных повреждений их головки [6, 14, 15].

Заключение

В процессе производства рельсов из стали К76Ф с помощью ультразвукового контроля выявлены дефекты главным образом в их шейке. Это неметаллические включения, сформировавшиеся в стали при выплавке, раскислении и разливке. Согласно выполненному электронно-микроскопическому исследованию они представляют собой сложные алюмосиликаты, сульфиды, окаймленные карбидами титана и ванадия, а также вкатаную при прокатке окалину.

Применяемая в производстве ПАО «ЧМК» рельсов схема выявления внутренних дефектов методом ультразвукового контроля достаточно эффективна. Однако для определения более полной картины распределения дефектов целесообразно использовать дополнительную секцию наклонных датчиков для головки рельса.

Литература

1. Воробьев, В.Б. Основные достижения в области улучшений условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений за 2006–2011 гг. / В.Б. Воробьев // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сб. науч. докл. – Екатеринбург: Изд-во ОАО «Уральский институт металлов», 2012. – С. 8–22.

2. Ермаков, В.М. Роль металлопродукции в системе ведения путевого хозяйства / В.М. Ермаков // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сб. науч. докл. – СПб.: Изд-во ПГУПС, 2012. – С. 25–34.

3. Павлов, В.В. Выбор технологических параметров термической обработки рельсов / В.В. Павлов // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сб. науч. докл. – Екатеринбург: Изд-во ОАО «УИМ», 2009. – С. 106–113.
4. Гольдштейн, М.И. Специальные стали / М.И. Гольдштейн, С.В. Грачев, Ю.Г. Векслер. – М.: Металлургия, 1985. – 408 с.
5. Полухин, П.И. Прокатка и термическая обработка железнодорожных рельсов / П.И. Полухин, Ю.В. Грудина, Е.Я. Зарвин. – М.: Металлургия, 1962. – 431 с.
6. Поляков, В.В. Основы технологии производства железнодорожных рельсов / В.В. Поляков, А.В. Великанов. – М.: Металлургия, 1990. – 416 с.
7. Эволюция структурно-фазовых состояний металла рельсов при длительной эксплуатации / В.Е. Громов, О.А. Перегудов, Ю.Ф. Иванов и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. – 164 с.
8. ГОСТ Р 51685–2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2014. – 156 с.
9. Рабовский, В.А. Вопросы нормативного обеспечения рельсового производства / В.А. Рабовский // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сб. науч. докл. – СПб.: Изд-во ОАО «УИМ», 2015. – С. 101–107.
10. СТО РЖД 1.15.004–2009. Объекты инфраструктуры железнодорожных дорог. – М.: Изд-во НИИ мостов и дефектоскопии Федерального агентства железнодорожного транспорта, 2009. – 15 с.
11. Макаров, А.А. Дефектоскопия рельсов. Формирование и анализ сигналов. Кн. 1: Основы / А.А. Макаров, Е.А. Кузнецова. – СПб.: Изд-во КультИнформПресс, 2010. – 292 с.
12. Гарбер, А.К. Анализ термодинамики процессов раскисления и оптимизация технологии внепечной обработки рельсовой стали: автореф. ... канд. техн. наук. – М.: Изд-во ОАО «МЗЭ», 2009. – 26 с.
13. Павлов, В.В. Взаимодействие системы «металлическая матрица – неметаллическое включение» в рельсовой стали / В.В. Павлов, Л.В. Корнева // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сб. науч. докл. – Екатеринбург: Изд-во ОАО «УИМ», 2010. – С. 76–81.
14. Рейхарт, В.А. Основные результаты полигонных испытаний рельсов на экспериментальном кольце ВНИИЖТ / В.А. Рейхарт, Я.А. Джанполадова // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сб. науч. докл. – Екатеринбург: Изд-во ОАО «УИМ», 2010. – С. 47–54.
15. Металловедение и термическая обработка стали: справ. / под ред. М.Л. Бернштейна, А.Г. Рахитадта. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1983. – Т. III. – 216 с.

Карева Надежда Титовна, канд. техн. наук, доцент кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; karevant@susu.ru.

Судариков Михаил Викторович, канд. хим. наук, младший научный сотрудник управления научной и инновационной деятельности, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; sudarikovmv@susu.ru.

Сивков Павел Анатольевич, студент кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; sivkov_pavel_74@mail.ru.

Поступила в редакцию 27 декабря 2020 г.

RESEARCH OF DEFECTS DURING MANUFACTURING R65 RAILS FROM K76F STEEL BY MODERN METHODS OF NON-DESTRUCTIVE TESTING

N.T. Kareva, karevant@susu.ru,
M.V. Sudarikov, sudarikovmv@susu.ru,
P.A. Sivkov, sivkov_pavel_74@mail.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Non-destructive testing of rails is one of the most important stages of production because it allows the most objective determination of whether rails manufactured according to a certain technological process meet the necessary requirements. The ability to withstand constant shock loads is one of the important parameters that characterize the durability of rails, especially at negative temperatures. This characteristic depends on many factors, including the size and nature of the distribution of non-metallic inclusions, grain size, the presence of strengthening particles, the uniformity of their distribution and much more. Non-destructive methods of examination are carried out by continuous control over the entire cross-section of each rail directly during their production to prevent contact-fatigue cracks and other defects during their operation, which can provoke disturbances in railway transport operation.

The tasks of improving the process of detecting defects by nondestructive testing methods remain relevant because of the many factors affecting them or even a complex of factors.

This paper presents the results of evaluation of internal metallurgical defects detected by nondestructive ultrasonic flaw detection during production of rails R65 made of steel K76F. Electron-microscopic examination of chemical composition, structure, size, shape, character of distribution of the detected defects has been carried out. They represent complex aluminosilicates, sulfides, bordered by titanium and vanadium carbides, and also scale rolled during rolling.

Defects were found mainly in the rail neck. These are non-metallic inclusions formed in the steel during melting, deoxidizing, casting and rolling. The crystallization conditions of the continuously cast billet promote the formation of nonmetallic inclusions mainly in its center, from which the rail neck is formed during subsequent rolling.

Keywords: non-destructive testing, rail steel K76F, non-metallic inclusions, contact-fatigue strength.

References

1. Vorobiev V.B. [Improving the quality and operating conditions rails and rail fasteners]. *Improvement of Quality and Operating Conditions of Rails and Rail Bonds: Collection of scientific reports*. Ekaterinburg, JSC Ural Institute of Metals Publ., 2012, pp. 8–22. (in Russ.)
2. Ermakov V.M. [The role of metal products in the track management system]. *Improvement of Quality and Operating Conditions of Rails and Rail Bonds: Collection of scientific reports*. St. Petersburg, PGUPS Publ., 2012. – pp. 25–34. (in Russ.)
3. Pavlov V.V. [Selection of Technological Parameters of Thermal Processing of Rails]. *Improvement of Quality and Operating Conditions of Rails and Rail Bonds: Collection of scientific reports*. Ekaterinburg, JSC Ural Institute of Metals Publ., 2009, pp. 106–113. (in Russ.)
4. Goldstein M.I., Grachev S.V., Veksler Yu.G. *Spetsial'nyye stali* [Special Steels]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985. 408 p.
5. Polukhin P.I., Grudina Y.V., Zarvin E.Y. *Prokatka i termicheskaya obrabotka zhelezodorozhnykh rel'sov* [Rolling and heat treatment of railway rails]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1962. 431 p.
6. Polyakov V.V., Velikanov A.V. [Fundamentals of technology of rails production]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1990. 416 p.
7. Gromov V.E., Peregudov O.A., Ivanov Yu.F. et al. *Evolyutsiya strukturno-fazovykh sostoyaniy metalla rel'sov pri dlitel'noy ekspluatatsii* [Structure and Phase State Evolution of Rails Metal at Prolonged Operation]. Novosibirsk, Siberian Branch of RAS Publ., 2017. 164 p.

8. *GOST R 51685–2013*. [Rail Rails. General Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 156 p. (in Russ.)
9. Rabovsky V.A. [Regulatory support of rail production]. *Improvement of Quality and Operating Conditions of Rails and Rail Bonds: Collection of scientific reports*. St. Petersburg, JSC Ural Institute of Metals Publ., 2015, pp. 101–107.
10. *STO RZHD 1.15.004–2009*. [Objects of railway infrastructure]. Moscow, Research Institute of bridges and defectoscopy of the Federal Agency for Railway Transport Publ., 2009. 15 p. (in Russ.)
11. Makarov A.A., Kuznetsova E.A. *Defektoskopiya rel'sov. Formirovaniye i analiz signalov. Kn. 1: Osnovy* [Rail defectoscopy. Signal forming and analysis. Book 1: Fundamentals]. St. Petersburg, Kul'tInformPress Publ., 2010. 292 p.
12. Garber A.K. *Analiz termodinamiki protsessov raskisleniya i optimizatsiya tekhnologii vnepechnoy obrabotki rel'sovoy stali: avtoref. kand. tekhn. nauk* [Analysis of thermodynamics of deoxidizing processes and optimization of rail steel out-of-furnace treatment technology. Abstract of cand. sci. diss.]. Moscow, 2009. 26 p.
13. Pavlov V.V., Korneva L.V. [Interaction of system “metallic matrix – nonmetallic inclusion” in rail steel]. *Improvement of Quality and Operating Conditions of Rails and Rail Bonds: Collection of scientific reports*. Ekaterinburg, JSC Ural Institute of Metals Publ., 2010, pp. 76–81. (in Russ.)
14. Reikhard V.A., Dzhanpoladova J.A. [The main results of the polygon tests of rails on the experimental ring of VNIIZhT]. *Improvement of Quality and Operating Conditions of Rails and Rail Bonds: Collection of scientific reports*. Ekaterinburg, JSC Ural Institute of Metals Publ., 2010, pp. 47–54. (in Russ.)
15. Bernstein M.L., Rakhshadt A.G. (Eds.). *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka stali: spravochnik. T. III* [Metallurgy and heat treatment of steel. Handbook. Vol. III]. 3rd ed. revised and supplemented. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983. 216 p.

Received 27 December 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Карева, Н.Т. Исследование дефектов при производстве рельсов Р65 из стали К76Ф современными способами неразрушающего контроля / Н.Т. Карева, М.В. Судариков, П.А. Сивков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 26–34. DOI: 10.14529/met210103

FOR CITATION

Kareva N.T., Sudarikov M.V., Sivkov P.A. Research of Defects during Manufacturing R65 Rails from K76F Steel by Modern Methods of Non-Destructive Testing. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 26–34. (in Russ.) DOI: 10.14529/met210103