

Природа внутренних дефектов железнодорожных рельсов производства АО "ЕВРАЗ ЗСМК", выявляемых при ультразвуковом контроле в потоке стана

А. А. УМАНСКИЙ¹, канд. техн. наук, А. С. СИМАЧЕВ¹, канд. техн. наук, А. В. ГОЛОВАТЕНКО², канд. техн. наук, Л. В. ДУМОВА¹

¹ Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия (umanskii@bk.ru)

² АО "ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат", г. Новокузнецк, Россия

Исследована природа дефектов в железнодорожных рельсах производства АО "ЕВРАЗ ЗСМК" с использованием металлографического и рентгенофазового анализов. Дополнительно проведен регрессионный анализ влияния параметров производства рельсовой стали на вероятность отбраковки рельсов. Рассмотрены механизмы образования внутренних дефектов. Показано, что наиболее характерными внутренними дефектами рельсов, приводящими к их отбраковке при ультразвуковом контроле, являются расслоения со скоплениями непластичных и легкоплавких неметаллических включений. Установлено значимое влияние параметров выплавки и внепечной обработки рельсовой стали на вероятность образования указанных дефектов рельсов.

Ключевые слова: железнодорожные рельсы; внутренние дефекты; ультразвуковой контроль; неметаллические включения; расслоение; трещины; рельсовая сталь.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие в отечественной металлургии достигнуты значительные успехи в производстве рельсовой продукции, связанные в том числе и с коренной модернизацией рельсового производства. Несмотря на это, остается ряд существенных технологических проблем, касающихся качества железнодорожных рельсов. Одной из наиболее значимых среди них является высокий уровень отбраковки рельсов при ультразвуковом контроле в потоке рельсобалочных станов из-за наличия недопустимых внутренних дефектов. Указанная отбраковка, достигающая 4–5 % от общего объема производства рельсов, приводит к значительному увеличению их себестоимости и снижает производительность рельсобалочных станов. Все это делает задачу улучшения качества рельсов актуальной и на сегодняшний день.

Следует отметить, что вследствие значительных изменений технологии производства рельсовой стали и рельсов, произошедших в последние годы, использование результатов исследований качества рельсов, проведенных ранее другими авторами, неэффективно. Так, за последние 10 лет на АО "ЕВРАЗ ЗСМК" внедрены следующие технические решения, оказавшие существенное влияние на структуру рельсов: изменение технологии раскисления рельсовой стали (отказ от использования алюминия в качестве раскислителя) [1, 2]; переход на массовое производ-

ство рельсов из сталей, дополнительно легированных хромом, и сталей с содержанием углерода, повышенным до заэвтектоидных значений [3, 4]; изменение схемы внепечной термической обработки стали путем внедрения последовательной обработки на двух агрегатах "ковш-печь" [5, 6]; внедрение электромагнитного перемешивания и "мягкого обжата" в процессе непрерывной разливки стали [7, 8]; переход на прокатку рельсов с использованием непрерывной группы универсальных клетей взамен прокатки в двухвалковых клетях [9, 10]; переход на дифференцированную закалку рельсов сжатым воздухом вместо объемной закалки в масле [11–13].

На основании данных, приведенных выше, необходимой теоретической базой для разработки технических решений, направленных на повышение качества рельсов, является получение научно-обоснованной информации о природе характерных дефектов рельсов текущего производства.

Цель настоящей работы — исследование природы характерных внутренних дефектов железнодорожных рельсов, вызывающих их отбраковку при контроле качества в потоке рельсобалочных станов.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследовали образцы железнодорожных рельсов категорий ДТ350 (сталь Э76ХФ) и ДТ370ИК (сталь Э90ХАФ) текущего производства АО "ЕВРАЗ ЗСМК", отбракованные по результатам ультразвуко-

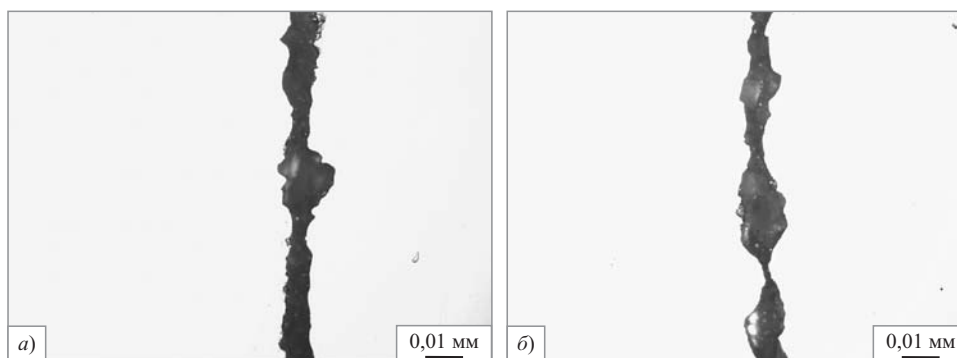


Рис. 1. Фрагменты расслоения в шейке железнодорожных рельсов

вого контроля качества структуры в потоке рельсобалочного стана.

Для исследования природы дефектов, послуживших причиной отбраковки, использован металлографический анализ (световой микроскоп OLYMPUS GX-51) и рентгенофазовый анализ (рентгеновский дифрактометр "Shimadzu XRD-6000"). С целью определения причин образования дефектов дополнительно проведен регрессионный анализ влияния параметров производства рельсовой стали на вероятность отбраковки рельсов. Использован метод пассивного эксперимента – анализ паспортов 500 плавок рельсовой стали Э76ХФ текущего производства электросталеплавильного цеха АО "ЕВРАЗ ЗСМК". При этом для обеспечения воспроизводимости результатов анализировали две выборки плавок — с повышенным и пониженным уровнем отбраковки соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам металлографических исследований образцов рельсов, отбракованных при ультразвуковом контроле, установлено, что характерные внутренние дефекты располагаются в шейке рельсов и их можно условно разделить на два вида.

Первый вид дефектов представляет собой расслоения относительно больших размеров (длиной до 5 мм и более), характеризующиеся наличием значительных скоплений неметаллических включений в области их расположения (рис. 1). Такие внутренние дефекты являются наиболее частой (85 % случаев) причиной отбраковки рельсов.

Рентгенофазовым анализом (рис. 2) определено, что в месте локализации таких дефектов присутствуют скопления непластичных неметаллических включений силлиманита Al_2SiO_5 (33 % Al; 18 % Si;

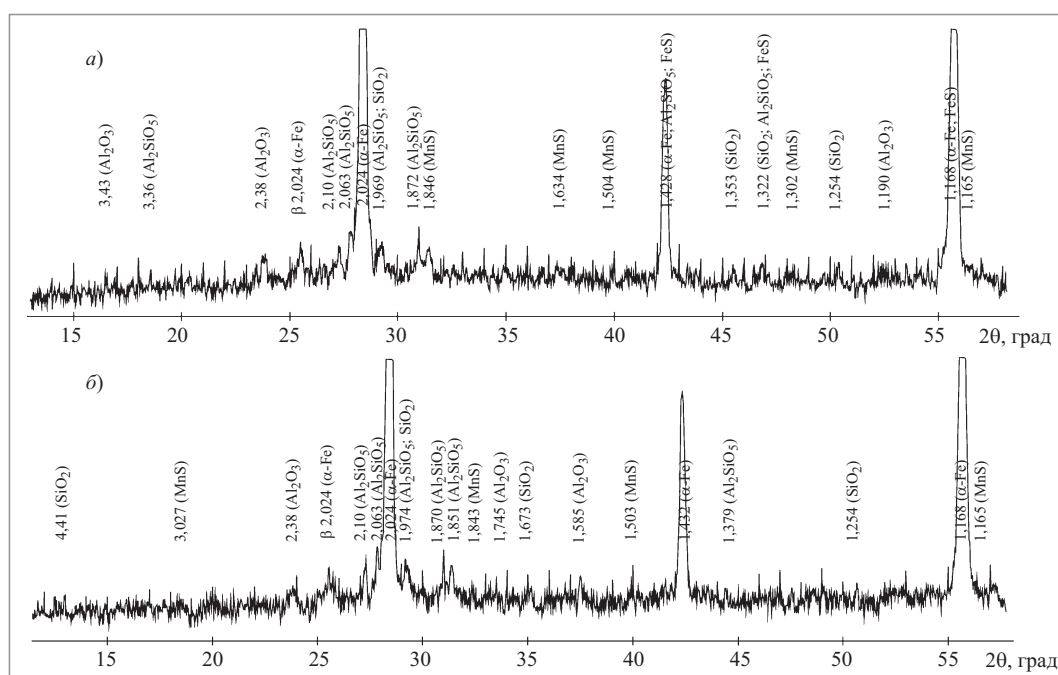


Рис. 2. Участки дифрактограмм от области локализации расслоения в шейке рельсов в зоне расположения начала (а) и конца (б) дефекта

Таблица 1. Размеры неметаллических включений в железнодорожных рельсах

Неметаллические включения	Максимальный балл включений		
	Головка	Шейка	Подошва
Силикаты недеформирующиеся	2а/2б	4а/4а	3а/3б
Сульфиды	3а/3б	1а/—	—/—
Оксиды точечные	1б/1а	2а/1а	—/—
Силикаты пластичные	3а/3б	1б/2а	1а/—
Нитриды алюминия	2а/1б	1б/2б	3а/3б

Примечание. В числителе приведен максимальный балл включений в отбракованных рельсах, в знаменателе — в годных рельсах (ГОСТ 1778–70).

49 % O); оксида кремния SiO₂ (47 % Si; 53 % O); корунда Al₂O₃ (53 % Al; 47 % O), а также легкоплавких включений сульфида железа FeS. Кроме того, выявлено значительное количество включений алабандина MnS (67 – 70 % Mn; 33 – 30 % S).

Анализ неметаллических включений вне зоны расположения дефектов первого типа, проведенный по стандартной полуколичественной методике по ГОСТ 1778–70, показал, что состав и концентрация включений значимо не отличается от годных рельсов текущего производства (табл. 1).

Согласно полученным данным, внутренние дефекты второго типа представляют собой трещины относительно малых размеров (длиной до 1 мм), вытянутые в направлении прокатки (рис. 3). При этом в отличие от дефектов, приведенных на рис. 1, в зоне их локализации отсутствуют скопления неметаллических включений. Такие дефекты встречаются в отбракованных железнодорожных рельсах примерно в 15 % случаев.

На основании статистических исследований, проведенных на выборке из плавок с повышенным уровнем отбраковки рельсов (табл. 2), установлено значимое влияние на отбраковку рельсов по внутрен-

ним дефектам следующих технологических параметров производства рельсовой стали: содержание серы на выпуске из дуговой сталеплавильной печи (ДСП); основность шлака и продолжительность продувки аргоном при внепечной обработке стали на агрегате "ковш-печь" (АКП); содержание водорода, меди и олова в готовой стали. Увеличение содержания серы, водорода, меди и олова в стали приводит к росту отбраковки рельсов, а увеличение основности шлака и длительности продувки инертным газом при обработке на АКП способствует снижению вероятности образования внутренних дефектов рельсов. На основании статистической обработки данных в паспортах 500 плавок рельсовой стали Э76ХФ текущего производства с использованием стандартной методики множественного регрессионного анализа получено уравнение, позволяющее определить долю отбраковки рельсов B_{пов} (%) при ультразвуковом контроле на выборке плавок с повышенным уровнем отбраковки:

$$B_{пов} = 20,5 + 30,23[S]_{вып} - 0,03D_{прод} - 1,16O_{сн} + 7,70[H] + 31,12[Cu] + 210,86[Sn], \quad (1)$$

где [S]_{вып} — содержание серы в стали на выпуске ДСП, %; D_{прод} — длительность продувки при обработке на АКП, %; O_{сн} — основность шлака при обработке на АКП, %; [H] — содержание водорода в стали после вакуумирования, ppm; [Cu] — содержание меди в готовой стали, %; [Sn] — содержание олова в готовой стали, %.

Исследованиями, проведенными на выборке плавок с пониженным уровнем отбраковки рельсов (табл. 3), подтверждена воспроизводимость полученных результатов и получено уравнение:

$$B_{пон} = 0,4 + 25,12[S]_{вып} - 0,02D_{прод} - 0,84O_{сн} + 4,1[H] + 23,2[Cu] + 155,61[Sn], \quad (2)$$

где B_{пон} — отбраковка рельсов при ультразвуковом контроле на выборке плавок с пониженным уровнем отбраковки, %.

Таблица 2. Статистические характеристики функций и параметра оптимизации для анализа отбраковки железнодорожных рельсов по внутренним дефектам

Параметр	Область изменения	Среднее значение	Среднее квадратическое отклонение
Брак УЗК, %	0 – 38,5	27,3	5,6
Содержание серы на выпуске из ДСП, %	0,019 – 0,078	0,031	0,005
Длительность продувки аргоном на АКП, мин	7,2 – 268	76,7	16,8
Основность шлака АКП	1,2 – 5,1	2,6	0,38
Содержание водорода в стали после вакуумирования, ppm	0,6 – 1,5	0,96	0,16
Содержание меди в готовой стали, %	0,06 – 0,16	0,094	0,014
Содержание олова в готовой стали, %	0,003 – 0,014	0,005	0,001

Примечание. Приведена выборка плавок с повышенным уровнем отбраковки.

Таблица 3. Статистические характеристики функций и параметра оптимизации для анализа отбраковки железнодорожных рельсов по внутренним дефектам

Наименование	Область изменения	Среднее значение	Среднее квадратическое отклонение
Брак УЗК, %	0 – 12,3	3,1	1,8
Содержание серы на выпуске из ДСП, %	0,018 – 0,045	0,026	0,004
Длительность продувки аргоном на АКП, мин	43 – 252	85,1	11,2
Основность шлака АКП	1,8 – 4,9	2,6	0,27
Содержание водорода в стали после вакуумирования, ppm	0,7 – 1,2	0,83	0,09
Содержание меди в готовой стали, %	0,05 – 0,13	0,081	0,011
Содержание олова в готовой стали, %	0,002 – 0,011	0,004	0,001

Пр и м е ч а н и е . Приведена выборка плавок с пониженным уровнем отбраковки.

Необходимо отметить, что приведенные выше уравнения регрессии (1), (2) устанавливают взаимосвязь между параметрами производства рельсовой стали и отбраковкой рельсов независимо от вида дефекта (рис. 1 и 3) по той причине, что отнесение дефекта к конкретному виду согласно принятой условной классификации на массиве плавок, необходимым для проведения статистического анализа, является технически не осуществимым.

При этом, если исходить из физического смысла, на образование дефектов в виде расслоений со скоплениями неметаллических включений (рис. 1) значимое влияние оказывают: содержание серы в стали на выпуске из ДСП; основность шлака; продолжительность продувки аргоном при обработке на АКП. Так, увеличение содержания серы в стали обуславливает соответствующее повышение содержания в рельсах неметаллических сульфидных включений. Повышение основности шлака и увеличение длительности продувки при обработке на АКП, наоборот, способствует снижению концентрации неметаллических включений за счет их ассимиляции шлаком.

Влияние увеличения содержания меди, олова и водорода в стали на увеличение отбраковки рельсов,

очевидно, связано с вероятностью образования дефектов второго типа — внутренних трещин без скопления неметаллических включений (рис. 3).

Согласно общепринятым представлениям, механизм влияния меди и олова, усиливающий процесс образования нежелательных дефектов стального металлопроката, связан со склонностью данных примесей к сегрегации в межзеренных пространствах и низкой температурой плавления [14, 15]. Повышение общей концентрации указанных остаточных примесей в стали приводит к пропорциональному увеличению их содержания на границах зерен, что обуславливает охрупчивание металла при температурах горячей прокатки и увеличивает вероятность образования дефектов. Необходимо отметить, что полученные результаты качественно и количественно совпадают с результатами ряда других исследований, проведенных применительно к металлопрокату различного назначения. Так, верхний предел диапазона изменения содержания меди и олова на рассматриваемой выборке (табл. 2 и 3) соответствует пороговым концентрациям, после достижений которых по данным работ [16 – 19] происходит значимое ухудшение качества стали.

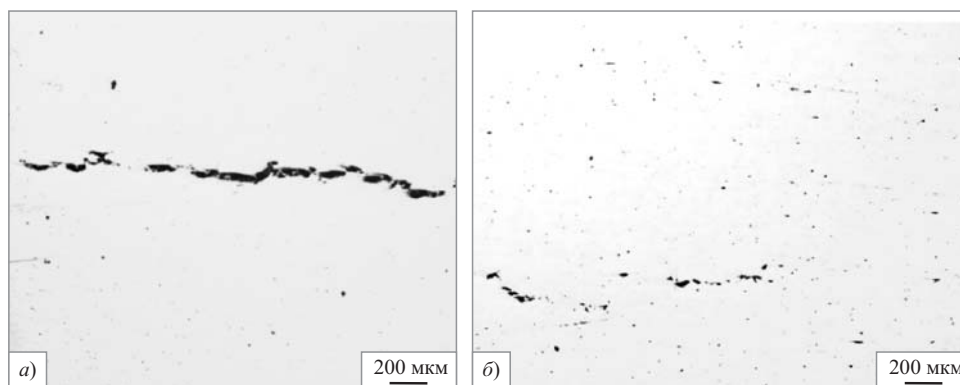


Рис. 3. Начальная (а) и конечная (б) зоны внутренней трещины, образовавшейся в шейке железнодорожных рельсов

Общеизвестно, что повышение содержания водорода способствует увеличению вероятности образования внутренних дефектов в виде флокенов. При этом следует отметить, что на рассматриваемой выборке верхний предел содержания водорода в стали (1,5 ppm и 1,2 ppm — табл. 2 и 3) меньше концентраций, признаваемых "опасными" большинством исследователей (более 2,0 – 2,5 ppm). В данном случае очевидно значимое воздействие других факторов, сдвигающих границы допустимого содержания водорода в сторону меньших значений. К таким факторам, исходя из применения технологии дифференцированной закалки рельсов, следует прежде всего отнести наличие значительных внутренних напряжений [20].

В целом приведенные выше результаты металлографических и статистических исследований свидетельствуют о сталеплавильном происхождении характерных внутренних дефектов рельсов, являющихся причинами их отбраковки при ультразвуковом контроле качества структуры. Хотя для полученных уравнений множественной регрессии (1) и (2) объясненная суммарная относительная степень влияния параметров металлургического передела составляет 75 и 69 % соответственно, оставшиеся 25 и 31 % необъясненной вариации не могут быть отнесены к влиянию параметров прокатного передела исходя из результатов металлографических исследований. Необъясненная доля влияния в данном случае связана с параметрами сталеплавильного передела, не фиксируемыми инструментально в процессе производства рельсовой стали, а также с невозможностью разделения дефектов по видам при статистическом анализе.

ВЫВОДЫ

1. На основании комплекса исследований, проведенных с использованием методик металлографического, рентгенофазового и статистического анализа установлена природа и механизмы образования характерных внутренних дефектов железнодорожных рельсов, являющихся причинами их отбраковки при ультразвуковом контроле.

2. Характерные внутренние дефекты можно условно разделить на два вида: расслоения относительно больших размеров (длиной до 5 мм и более) со скоплениями непластичных и легкоплавких неметаллических включений в области их локализации; трещины относительно малых размеров (длиной до 1 мм) без значимых скоплений неметаллических включений. При этом характерные дефекты вне зависимости от их вида располагаются в шейке рельсов.

3. Характерные внутренние дефекты рельсов имеют сталеплавильное происхождение. При этом вероятность образования расслоений значимо определяется содержанием серы в стали на выпуске из

плавильного агрегата и параметрами ее внепечной обработки на установке "ковш-печь", а вероятность образования внутренних трещин — содержанием водорода, меди и олова в стали.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Кемеровской области в рамках научного проекта № 20-48-420011.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aleksandrov I. V., Kuznetsov E. P., Boikov D. V. et al. Improving rail-steel production // *Steel in Translation*. 2013. V. 43, No. 2. P. 69 – 72.
2. Kozyrev N. A., Boikov D. V. Possibilities of improving the quality of rail steel // *Russian metallurgy (Metally)*. 2012. No. 12. P. 1062 – 1064.
3. Полевой Е. В., Волков К. В., Головатенко А. В. и др. Совершенствование технологии производства рельсов на ОАО "ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат" // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2013. № 4. С. 26 – 28.
4. Yur'ev A. B., Godik L. A., Nugumanov R. F. et al. Production and quality of E90AФ steel rail // *Steel in Translation*. 2009. V. 39, No. 8. P. 633 – 635.
5. Umansky A. A., Kozyrev N. A., Boykov D. V., Dumova L. V. Improvement of the extra-furnace rail steel processing on the ladle-furnace unit in order to increase the operational stability of railway rails // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. V. 411(1). 012078.
6. Kozyrev N. A., Protopopov E. V., Umanskii A. A., Boiko D. V. Improving the reduction and ladle treatment of Electrosteel for rail production // *Steel in Translation*. 2015. V. 45, No. 10. P. 717 – 722.
7. Shablovskii V. A., Klyuchkin A. V., Kuznetsov E. P. et al. Selecting mixtures for continuous casting of rail steel at ОАО EVRAZ ZSMK // *Steel in Translation*. 2012. V. 42, No. 4. P. 336 – 339.
8. Фейлер С. В., Полевой Е. В., Дементьев В. П. Исследование ливкационных процессов при непрерывной разливке рельсовой стали // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2014. № 2. С. 23 – 25.
9. Юрьев А. Б., Юнин Г. Н., Головатенко А. В. и др. Разработка и внедрение первой в России технологии производства дифференцированно-термоупрочненных рельсов с использованием тепла прокатного нагрева // *Сталь*. 2016. № 11. С. 33 – 35.
10. Golovatenko A. V., Umansky A. A., Dorofeev V. V. Analysis of the main trends in the development of rail production in Russia and abroad // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. V. 150(1). 012002.
11. Polevoi E. V., Yunin G. N., Temlyantsev M. V. Differential heat treatment of rails by means of rolling heat // *Steel in Translation*. 2016. V. 46, No. 10. P. 692 – 700.
12. Polevoi E. V., Yunin G. N., Golovatenko A. V., Temlyantsev M. V. New rail products at AO EVRAZ ZSMK // *Steel in Translation*. 2019. V. 49, No. 7. P. 484 – 488.
13. Polevoi E. V., Volkov K. V., Kuznetsov E. P. et al. Differential heat treatment of rails // *Steel in Translation*. 2014. V. 44, No. 7. P. 550 – 552.
14. *Медь в черных металлах: сборник / Под ред. И. Ле Мэй, Л. М. Д. Шетки: пер. с англ. И. Д. Марчуковой, А. Н. Штейнберга. М.: Металлургия, 1988. 310 с.*
15. Гинцбург Я. С., Андрацкий К. К. Прокатка качественной стали. М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1953. 464 с.
16. Голубцов В. А. Теория и практика введения добавок в сталь вне печи. Челябинск, 2006. 423 с.

17. Троцан А. И., Карликова Я. П., Носоченко О. В. и др. Зависимость качества непрерывнолитой стали от содержания примесей цветных металлов // Вестник Приазовского государственного технического университета. 2008. Вып. 18. С. 71 – 75.
18. Жульев С. И., Гузенков С. А., Данилин В. В. Совместное влияние примесных элементов в высококачистой стали на конструкционную прочность металлоизделий // Известия вузов. Черная металлургия. 2004. № 5. С. 48 – 50.
19. Дегенкольбе Й., Кальва К., Кауп К. Воздействие примесей на свойства материалов // Черные металлы. 1988. № 11. С. 3 – 12.
20. Башнин Ю. А., Цурков В. Н., Коровина В. М. Термическая обработка крупногабаритных изделий и полуфабрикатов на металлургических заводах. М.: Металлургия, 1985. 176 с.

Статья поступила в редакцию 21.12.2021 г.

Nature of internal defects in railroad rails produced by the "EVRAZ ZSMK" Company detected by ultrasonic control in the mill train

A. A. Umanskii¹, A. S. Simachev¹, A. V. Golovatenko² and L. V. Dumova¹

¹ Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

² "EVRAZ ZSMK" Company (United West-Siberian Iron and Steel Works) Novokuznetsk, Russia

The nature of defects arising in railroad rails produced by the "EVRAZ ZSMK" Company is studied with the use of metallographic and x-ray phase analysis. An additional regression analysis of the effect of the parameters of production of the rail steel on the probability of rejection of rails is performed. It is shown that the most typical internal defects causing rejection under ultrasonic control are stratifications with accumulations of nonplastic and fusible nonmetallic inclusions. The parameters of the melting and of the out-of-furnace treatment of the rail steel affect significantly the probability of formation of the mentioned defects in rails.

Keywords: railroad rails, internal defects, ultrasonic control, nonmetallic inclusions, stratifications, cracks, rail steel.

Информация о подписке на журнал "Металловедение и термическая обработка металлов"

Оформить **подписку на печатную версию** журнала "Митом" с любого номера текущего года или **приобрести отдельную статью в формате PDF, включая архивные публикации**, можно непосредственно на нашем сайте

<http://mitom.folium.ru/index.php/mitom/about/subscriptions>

Проводится также подписка на журнал "Митом":

- по **Объединенному каталогу "Пресса России"** (индекс **27847**);
- по **электронным каталогам** агентств **"Урал-Пресс"**, **ООО "ИВИС"** (<https://eivis.ru/footer/about>), **"Пресса по подписке"** (https://www.akc.ru/itm/metallovedenie-i-termic_heskay_a-obrabotka-metallov/).

Организациям для оформления подписки необходимо выслать заявку и реквизиты на почту mitom@folium.ru или montage@folium.ru для получения счета и последующего оформления документов на отгрузку (товарные накладные по форме ТОРГ 12 будут отправлены подписчику с каждым выпуском журнала по указанному адресу доставки).

Будем рады видеть Вас в числе подписчиков и авторов журнала!