

УДК 621.771.011

ИССЛЕДОВАНИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В РЕЛЬСАХ ИЗ ЭЛЕКТРОСТАЛЕЙ, ЛЕГИРОВАННЫХ ХРОМОМ*

Уманский А.А.¹, к.т.н., доцент кафедры металлургии черных металлов (umanski@bk.ru)
Головатенко А.В.², к.т.н., директор по рельсовому производству (Aleksey.Golovatenko@evraz.com)
Симачев А.С.¹, к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК» (simachev_as@mail.ru)

¹ Сибирский государственный индустриальный университет
 (654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат
 (654043, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ш. Космическое, 16)

Аннотация. На основании металлографических (с помощью микроскопа OLYMPUS GX-51») и спектральных (с использованием спектрометра «ARL iSpark», метод «Spark-DAT») исследований определены вид, относительная концентрация и размеры наиболее характерных неметаллических включений по элементам (головка, шейка) железнодорожных рельсов из электростали марок Э76ХФ и Э90ХАФ. Установлено, что наибольшую относительную концентрацию имеют сульфиды марганца (MnS) – 30,8 – 43,4 ppm. При этом 60 – 100 % включений указанного типа имеют малые (менее 4 мкм) размеры. Это не позволяет их обнаружить при стандартном металлографическом анализе со 100-кратным увеличением. Выявленная высокая относительная концентрация сульфидных включений напрямую коррелирует с установленной положительной ликвацией по сере в рассматриваемых элементах рельса, составляющей до 40 %. Несмотря на высокую концентрацию сульфидов марганца их влияние на качество рельсов можно признать не опасным, с учетом их высокой пластичности при горячей деформации и установленного преобладания включений данного типа малого (менее 4 мкм) размера. Среди включений силикатного типа значимую концентрацию имеют включения SiO₂ (3,4 – 14,9 ppm). Все выявленные включения этого типа имеют размер, не превышающий 4 мкм. Установлено, что концентрация сложных включений, имеющих в своем составе глинозем (Al₂O₃–CaO–MgO, Al₂O₃–CaO–MgO–CaS, Al₂O₃–CaO, Al₂O₃–MgO), незначительна: суммарно не превышает 3,1 ppm и 1,6 ppm для отдельных видов. Концентрация корунда (Al₂O₃) также незначительна и не превышает 0,3 ppm. При этом преобладают глиноземистые включения малого (менее 4 мкм) размера. В связи с низкой (с учетом относительной концентрации и размеров включений) загрязненностью непластичными силикатными и глиноземистыми неметаллическими включениями их влияние на качество рельсов не является значимым. Это подтверждается отсутствием дефектов, выявленных при ультразвуковом контроле.

Ключевые слова: железнодорожные рельсы, рельсовая сталь, легирование хромом, неметаллические включения, сульфиды, силикаты, пластичность, горячая деформация, ликвация.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-12-936-942

ВВЕДЕНИЕ

Загрязненность неметаллическими включениями является одной из ключевых характеристик качества железнодорожных рельсов и в значительной степени определяет их эксплуатационные свойства. При этом важную роль играет не только количество неметаллических включений, но также их состав, форма, размеры, распределение в объеме рельсов.

Несмотря на имеющееся значительное количество исследовательских работ, посвященных изучению неметаллических включений в рельсовой стали [1 – 7], а также их влиянию на механические и эксплуатационные характеристики рельсов [8 – 14], область их применения является ограниченной. Это объясняется

значительными технологическими особенностями производства рельсов за рубежом и существенными изменениями технологии производства рельсов и рельсовой стали в России, произошедшими в последние 5 – 10 лет. К указанным изменениям следует, прежде всего, отнести переход на массовое производство рельсов из сталей новых марок, легированных хромом, использование новых видов раскислителей и легирующих, изменение режимов внепечной обработки рельсовой стали, использование технологий внешних воздействий на сталь в процессе непрерывной разливки, переход на производство длинномерных (длиной до 100 м) рельсов на введенных в эксплуатацию универсальных рельсобалочных станах. В частности, на АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК»), являющемся на сегодняшний день ведущим отечественным производителем железнодорожных рельсов, в настоящее время наиболее массово производятся стали марок Э76ХФ

* Работа выполнена в СибГИУ с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Материаловедение» в рамках базовой части Государственного задания Минобрнауки РФ № 11.6365.2017/8.9.

и Э90ХАФ (взамен ранее массово использовавшихся Э76Ф и Э90АФ) [15, 16], произведен полный отказ от использования алюминия в качестве раскислителя, значительно (до двух раз) увеличена продолжительность продувки рельсовой стали инертным газом при внепечной обработке [17, 18], внедрены технологии электромагнитного перемешивания и «мягкого обжигания» в ходе реконструкции МНЛЗ, введен в эксплуатацию новый рельсобалочный стан с непрерывной группой универсальных клетей.

Таким образом, на основании вышесказанного проведение исследований состава и распределения неметаллических включений в железнодорожных рельсах в настоящее время является актуальной задачей.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объекта исследований использованы пробы, отобранные от головки и шейки годных (прошедших ультразвуковой контроль) рельсов текущего производства плавок сталей Э76ХФ и Э90ХАФ.

Исследования неметаллических включений проводили с использованием оптического микроскопа «OLYMPUS GX-51» методом стандартного полуколичественного анализа по ГОСТ 1778 – 70 и с использованием спектрометра «ARL iSpark» методом «Spark-DAT». Методика Spark-DAT (Spark Data Analysis and Treatment) позволяет определить вид, концентрацию и распределение неметаллических включений по размерам. Эта методика основана на разделении интенсивности сигнала фотоэлектронного умножителя на пики низкой интенсивности, которые относят к основному металлу, и пики высокой интенсивности, относящиеся к неметаллическим включениям [19 – 21]. В рамках указанной методики на первом этапе применен метод «Стандартного анализа включений», в котором количество включений определяется как количество пиков отдельного элемента или как совпадение пиков различных элементов. Для определения концентрации некоторых специфических видов включений (таких как алюминаты, сульфиды и силикаты) использован метод «Расширенного анализа включений» в качестве предустановленной модели. Для каждого образца проведено по четыре измерения.

Химический состав образцов определяли методами спектрального анализа с использованием спектрометра «ARL iSpark».

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам полуколичественного анализа установлено (табл. 1), что преобладающим типом неметаллических включений в годных рельсах являются силикаты недеформирующиеся (рис. 1, а). При этом в головке рельсов загрязненность включениями указанного типа заметно ниже по сравнению с шейкой.

Распределение неметаллических включений по элементам годных рельсов текущего производства

Table 1. Distribution of nonmetallic inclusions by elements of suitable rails of the current production

Вид включения	Распределение включений по элементам рельса		
	Головка		Шейка
	боковые пробы	центральные пробы	
рельс из стали Э76ХФ			
Силикаты недеформирующиеся	1б; 2б	1а; 1б	1а; 1б; 4а
Сульфиды	2б; 3б	–	–
Оксиды точечные	1а	–	1а
Силикаты пластичные	–	3б; 1а	2а
Нитриды алюминия	–	1б	1б; 2б
рельс из стали Э90ХАФ			
Силикаты недеформирующиеся	1б; 2а	1б	1б; 2б; 3б
Сульфиды	–	2б; 3б	–
Оксиды строчечные	2а	–	–
Силикаты пластичные	1а	2б	1б

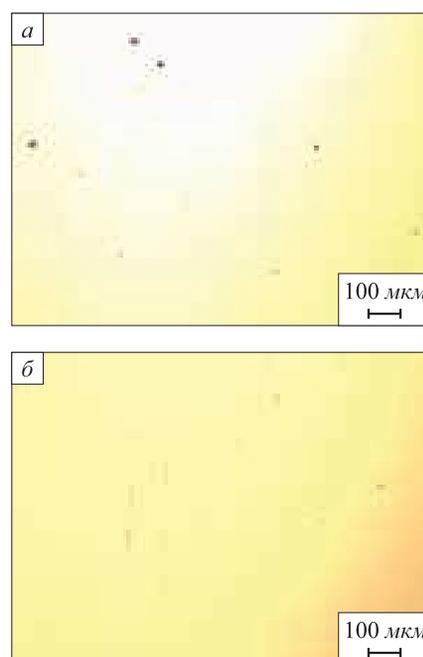


Рис. 1. Характерные неметаллические включения в рельсах из сталей Э76ХФ и Э90ХАФ:

а – силикаты недеформирующиеся в шейке рельса (балл 3б);
б – сульфиды в головке рельса (балл 3б)

Fig. 1. Typical non-metallic inclusions in rails made of steels E76KhF and E90KhAF:
а – non-deformed silicates in the rail web (score 3б); б – sulfides in the rail head (score 3б)

В головке рельсов преобладающим типом включений являются сульфиды (рис. 1, б). В анализируемых рельсах также присутствуют включения в виде силикатов пластичных, оксидов и нитридов алюминия, загрязненность которыми заметно ниже у рельсов из стали Э90ХАФ.

Анализ неметаллических включений, проведенный методом «Spark-DAT», показал, что наибольшую концентрацию в головке и шейке рельсов имеют сульфиды марганца MnS (30,8 – 43,4 ppm). При этом, в отличие от данных полуколичественного анализа, значимого различия концентраций указанного типа включений в головке и шейке не выявлено (рис. 2, а), что объясняется преобладанием включений малого (менее 4 мкм) размера, не выявляемых при стандартном металлографическом анализе со 100-кратным увеличением. По данным проведенного анализа в головке рельса из стали Э76ХФ все выявленные включения имеют малый (менее 4 мкм) размер, в головке рельса из стали Э90ХАФ доля включений малого размера составляет 59,9 % (рис. 2, з), а в шейке рельсов из стали Э76ХФ и Э90ХАФ – 56,2 и 72,1 % соответственно (рис. 2, б, в).

Исследованиями химического состава рельсов (табл. 2) установлено наличие положительной ликвации по сере и углероду в головке и шейке обоих рельсов: ликвация по сере составила до 30 % в головке и до 40 % в шейке, а ликвация по углероду – до 3,0 и 2,7 % соответственно. Наличие положительной ликвации по сере напрямую коррелирует с относительно высокой концентрацией сульфидов в рассматриваемых элементах рельса. Значимой ликвации остальных химических элементов не выявлено. При этом химический состав обоих анализируемых рельсов полностью соответствует требованиям ГОСТ Р 51685 – 2013.

Сульфиды марганца относятся к пластичным неметаллическим включениям, которые при горячей прокатке вытягиваются в строчки, поэтому их относительно высокую концентрацию, в особенности с учетом преобладания малого размера включений, можно признать не опасной для качества рельсов.

Среди включений силикатного типа достаточно высокую концентрацию имеет только оксид кремния SiO₂ (3,4 – 14,9 ppm), при этом все выявленные включения данного типа имеют малый размер – до 4 мкм. Концентрация сложных включений, имеющих в своем составе глинозем (Al₂O₃–CaO–MgO, Al₂O₃–CaO–MgO–CaS, Al₂O₃–CaO, Al₂O₃–MgO), незначительна: суммарно не превышает 3,1 ppm и 1,6 ppm для отдельных видов (рис. 3, а, 4, а). При этом наибольшую концентрацию имеют включения систем Al₂O₃–CaO–MgO (1,3 – 1,6 ppm) и Al₂O₃–CaO–MgO–CaS (0,9 – 1,2 ppm). Концентрация корунда (Al₂O₃) также незначительна и не превышает 0,3 ppm (рис. 3, а, 4, а). Касательно распределения глиноземистых включений по размерам можно отметить, что для большинства из них пре-

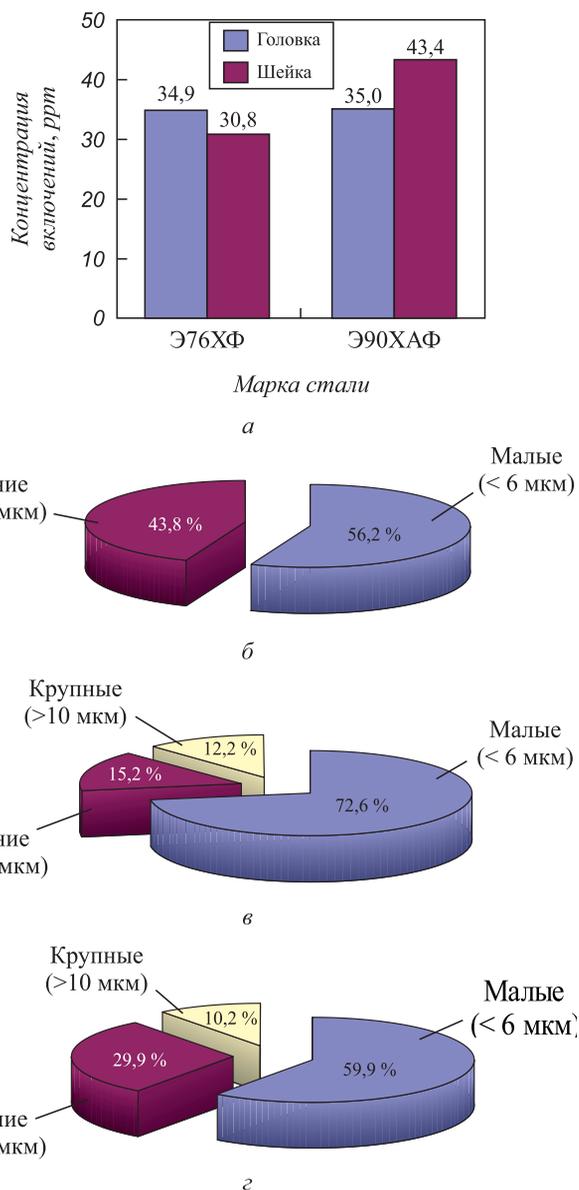


Рис. 2. Распределение сульфидов марганца по профилю рельсов из хромистых сталей: а – относительная концентрация включений; б, с – распределение включений по размерам в шейке рельсов из стали Э76ХФ (б) и Э90ХАФ (с); д – распределение включений по размерам в головке рельса из стали Э90ХАФ

Fig. 2. Distribution of manganese sulfides along the profile of rails made of chromium steels: а – relative concentration of inclusions; б, с – size distribution of inclusions in the rail web made of E76KhF (б) and E90KhAF (с) steel; д – size distribution of inclusions in the rail head made of E90KhAF steel

обладающим является малый (менее 4 мкм) размер (рис. 3, б, 4, б). Значительная доля неметаллических включений относительно крупных (более 10 мкм) размеров зафиксирована только для включений видов Al₂O₃–CaO–MgO и Al₂O₃–CaO–MgO–CaS в рельсе из стали Э76ХФ (рис. 3, б).

В целом, можно констатировать низкую (с учетом относительной концентрации и размеров включений) загрязненность анализируемых рельсов непластичны-

Химический состав рельсов по элементам профиля

Table 2. Chemical composition of rails by the profile elements

Содержание, % (по массе)	Место отбора проб для стали Э76ХФ				Место отбора проб для стали Э90ХАФ			
	головка	шейка	ковшечная проба	Требования ГОСТ Р 51685 – 2013	головка	шейка	ковшечная проба	Требования ГОСТ Р 51685 – 2013
C	0,809	0,811	0,790	0,710 – 0,820	0,886	0,872	0,860	0,830 – 0,950
Mn	0,936	0,936	0,940	0,750 – 1,250	0,739	0,749	0,780	0,750 – 1,250
Si	0,568	0,563	0,570	0,250 – 0,600	0,533	0,534	0,540	0,250 – 0,600
P	0,015	0,014	0,015	н.б. – 0,020	0,009	0,010	0,011	н.б. – 0,020
S	0,013	0,011	0,010	н.б. – 0,020	0,012	0,014	0,010	н.б. – 0,020
Ni	0,100	0,099	0,100	н.б. – 0,200	0,090	0,081	0,080	н.б. – 0,150
Cr	0,411	0,409	0,410	0,200 – 0,800	0,295	0,292	0,290	0,200 – 0,600
Cu	0,118	0,119	0,120	н.б. – 0,200	0,116	0,116	0,120	н.б. – 0,200
N	0,010	0,009	0,010	–	0,012	0,012	0,011	0,010 – 0,020
V	0,041	0,040	0,040	0,030 – 0,150	0,086	0,090	0,080	0,080 – 0,150
Ti	0,003	0,002	0,002	н.б. – 0,010	0,003	0,004	0,003	н.б. – 0,010
Al	0,003	0,002	0,003	н.б. – 0,004	0,003	0,003	0,004	н.б. – 0,004
Nb	0,002	0,001	0,002	–	0,001	0,001	0,001	–
Sn	0,007	0,006	0,007	–	0,005	0,006	0,006	–
Sb	0,0016	0,0015	0,002	–	0,0012	0,0013	0,002	–

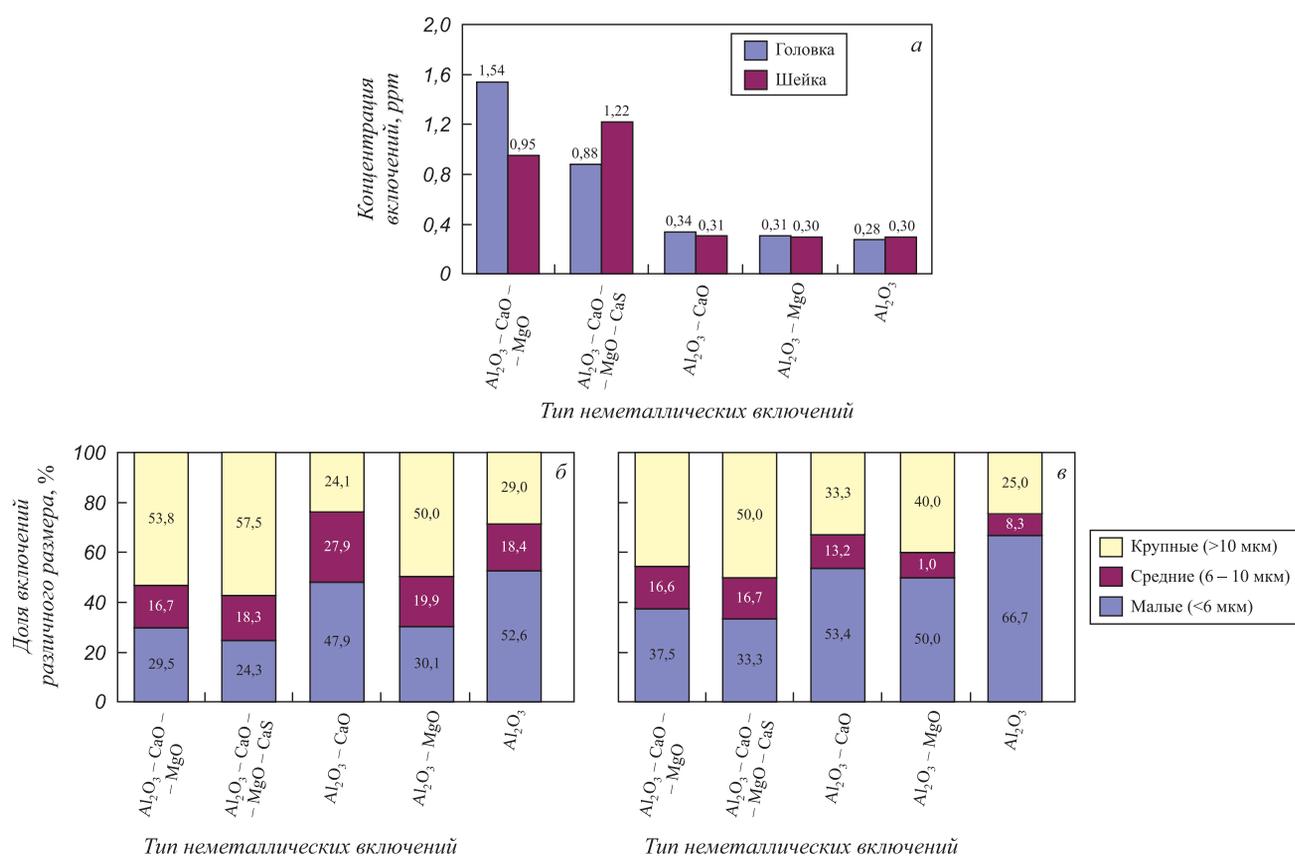


Рис. 3. Распределение глиноземистых включений по профилю рельса из стали Э76ХФ: а – относительная концентрация включений; б, в – размеры включений в головке и шейке рельса

Fig. 3. Distribution of alumina inclusions along the rail profile made of E76KhF steel: а – relative concentration of inclusions; б, в – dimensions of inclusions in the head and web of the rail

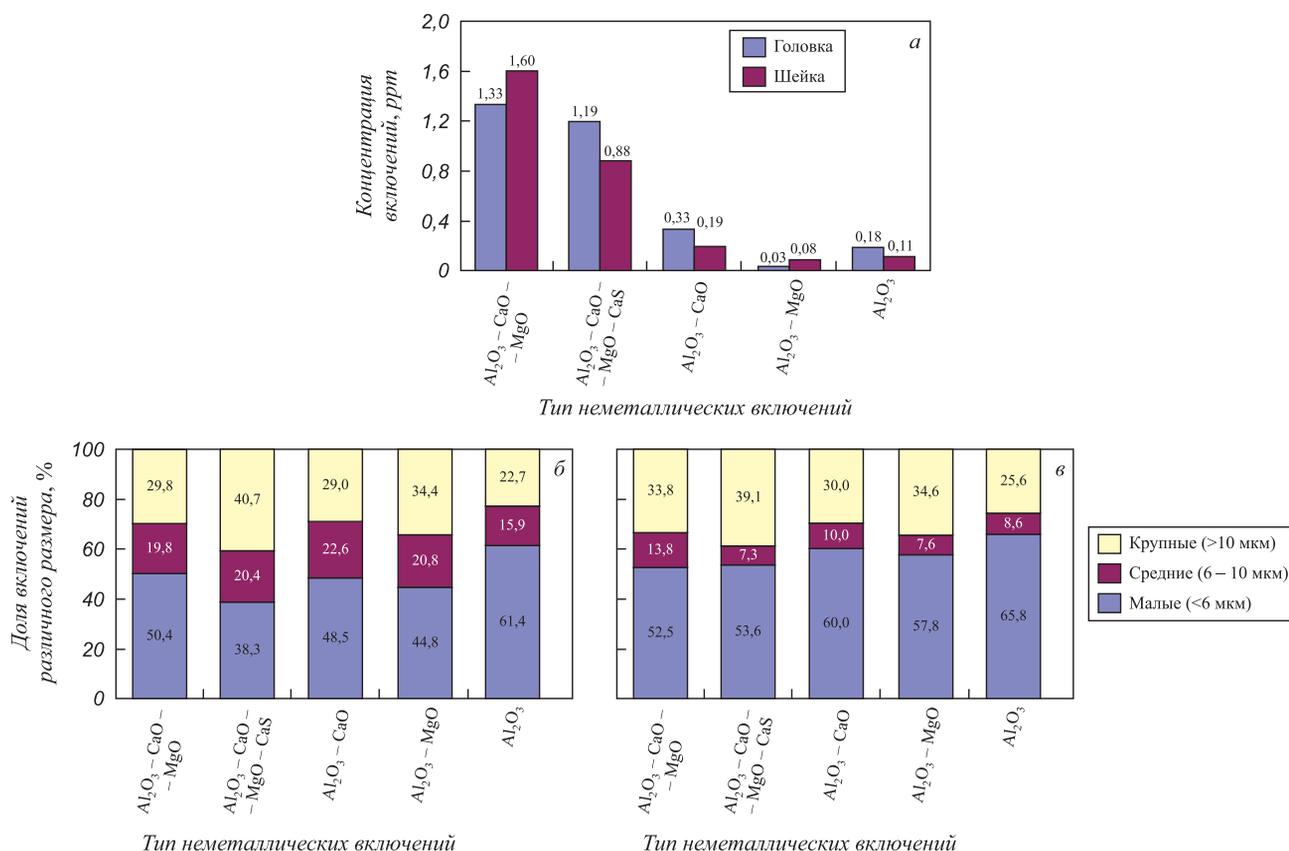


Рис. 4. Распределение глиноземистых включений по профилю рельса из стали Э90ХАФ: а – относительная концентрация включений; б, в – размеры включений в головке и шейке рельса

Fig. 4. Distribution of alumina inclusions along the rail profile made of E90KhAF steel: а – relative concentration of inclusions; б, в – dimensions of inclusions in the head and web of the rail

ми силикатными и глиноземистыми неметаллическими включениями. Указанные включения не оказывают значимого влияния на качество рельсов, что подтверждается отсутствием дефектов, выявленных при ультразвуковом контроле.

Выводы

Обобщая полученные результаты исследований неметаллических включений в рельсах из электростали марок Э76ХФ и Э90ХАФ текущего производства, можно сделать следующие основные выводы: наиболее распространенными неметаллическими включениями являются сульфиды марганца (MnS). Относительная концентрация таких включений составляет 30,8 – 43,4 ppm, при этом 60 – 100 % включений имеют малый (не более 4 мкм) размер. Выявленная высокая концентрация сульфидных включений напрямую коррелирует с установленной положительной ликвацией по сере в рассматриваемых элементах рельса. Сульфиды марганца относятся к пластичным неметаллическим включениям, поэтому их относительно высокую концентрацию, в особенности с учетом преобладания включений малого размера, можно признать неопасной для качества рельсов.

Среди непластичных включений относительно высокую концентрацию имеют силикаты недеформирующиеся SiO_2 (3,4 – 14,9 ppm) и сложные глиноземистые включения систем $Al_2O_3-CaO-MgO$, $Al_2O_3-CaO-MgO-CaS$ (до 1,6 и 1,2 ppm соответственно). Суммарная концентрация сложных глиноземистых включений не превышает 3,1 ppm, а корунда (Al_2O_3) – 0,3 ppm. При этом 100 % силикатных включений и большая доля глиноземистых включений имеет относительно малый (менее 4 мкм) размер. Зафиксированная низкая концентрация в совокупности с малым размером непластичных силикатных и глиноземистых неметаллических включений обусловили отсутствие их влияния на качество рельсов, что подтверждается отсутствием дефектов, выявленных при ультразвуковом контроле.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Zhang H., Liu C., Lin Q., Wang B., Liu X., Fang Q. Formation of plastic inclusions in U71Mn high-speed heavy-rail steel refined by CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO slag // Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science. 2019. Vol. 50. No. 1. P. 459 – 470.
- Kalisz D., Gerasin S., Bobrowski P., Zak P.L., Skowronek T. Computer simulation of microsegregation of sulphur and manganese and formation of MnS inclusions while casting rail steel // Archives of Metallurgy and Materials. 2016. Vol. 61. No. 4. P. 1939 – 1944.

3. Zhao K.-w., Zeng J.-h., Wang X.-h. Nonmetallic inclusion control of 350 km/h high speed rail steel // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2009. Vol. 16. No. 3. P. 20 – 26.
4. Garber A.K., Arsenkin A.M., Grigorovich K.V., Shibaev S.S., Kushnarev A.V., Petrenko Yu.P. Analysis of various versions of the deoxidation of rail steel at ОАО NTMK // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2009. Vol. 2009. No. 7. P. 581 – 586.
5. Григорович К.В., Шибаев С.В. Влияние технологии выплавки на чистоту стали по неметаллическим включениям. – В кн.: Неметаллические включения в рельсовой стали: сб. науч. тр. – Екатеринбург: изд. УИМ, 2005. С. 74 – 86.
6. Добужская А.Б., Смирнов Л.А., Мухранов Н.В., Фомичев М.С., Белокурова Е.В. Изучение состава неметаллических включений в рельсах // *Сталь*. 2015. № 5. С. 82 – 86.
7. Yur'ev A.B., Godik L.A., Devyatkin Yu.D., Kozyrev N.A., Tokarev A.V. Reduction of rail steel by calcium carbonate // *Steel in Translation*. 2008. Vol. 38. No. 4. P. 312 – 314.
8. Dhua S.K., Ray A., Sen S.K., Prasad M.S., Mishra K.B., Jha S. Influence of nonmetallic inclusion characteristics on the mechanical properties of rail steel // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2000. Vol. 9. No. 6. P. 700 – 709.
9. Григорович К.В., Арсенкин А.М., Трушников А.С. Неметаллические включения: оценка и прогноз эксплуатационной стойкости рельсов. – В кн.: Неметаллические включения в рельсовой стали: сб. науч. тр. – Екатеринбург: изд. УИМ, 2005. С. 102 – 115.
10. Добужская А.Б., Дерябин А.А., Семенов В.Е., Рейхарт В.А. Исследование состава и источников поступления неметаллических включений, вызывающих образование контактно-усталостных дефектов в рельсах производства нижнетагильского металлургического комбината // *Черная металлургия. Бюл. инта «Черметинформация»*. 2006. № 10. С. 33 – 36.
11. Козырев Н.А. Основные направления развития производства рельсов низкотемпературной надежности // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2011. Т. 54. № 4. С. 31 – 34.
12. Юрьев А.Б., Годик Л.А., Нугуманов Р.Ф., Козырев Н.А., Корнева Л.В. Производство и качество рельсов из стали марки Э90АФ // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2009. Т. 52. № 8. С. 34 – 37.
13. Godik L.A., Kozyrev N.A., Korneva L.V. Optimizing the oxygen content in rail steel // *Steel in Translation*. 2009. Vol. 39. No. 3. P. 240 – 242.
14. Yur'ev A.B., Godik L.A., Kozyrev N.A., Korneva L.V., Shcheglova A.B. 90АФ STEEL RAIL // *Steel in Translation*. 2008. Vol. 38. No. 7. P. 589 – 591.
15. Уманский А.А., Головатенко А.В., Темлянец М.В., Дорофеев В.В. Экспериментальные исследования пластичности и сопротивления деформации хромистых рельсовых сталей // *Черные металлы*. 2019. № 6. С. 24 – 28.
16. Уманский А.А., Головатенко А.В., Симачев А.С., Осолкова Т.Н., Дорофеев В.В. Экспериментальные исследования пластичности и сопротивления деформации хромистых рельсовых сталей // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2019. Т. 60. № 6. С. 452 – 460.
17. 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. Vol. 411. No. 012078.
18. Козырев Н.А., Протопопов Е.В., Уманский А.А., Бойков Д.В. Совершенствование технологии раскисления и внепечной обработки рельсовой электростали с целью повышения качества рельсового проката // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2015. Т. 58. № 10. С. 721 – 727.
19. Kuss H., Lungen S., Müller G. Comparison of spark OES methods for analysis of inclusions // *Anal. Bioanal. Chem*. 2002. Vol. 374. No. 11. P. 1242 – 1249.
20. Kuss H.M., Mittelstaedt H., Mueller G. Inclusion mapping and estimation of inclusion contents in ferrous materials by fast scanning laser-induced optical emission spectrometry // *Anal. At. Spectrom.* 2005. Vol. 20. No. 5. P. 730 – 735.
21. Бокк Д.Н., Лабусов В.А., Зарубин И.А. Определение неметаллических включений в металлических сплавах методом атомно-эмиссионной спектроскопии с искровым возбуждением // *Заводская лаборатория*. 2015. Т. 81. № 1. С. 92 – 97.

Поступила в редакцию 5 сентября 2019 г.
После доработки 27 сентября 2019 г.
Принята к публикации 18 октября 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. NO. 12, pp. 936–942.

NONMETALLIC INCLUSIONS IN RAILS MADE OF ELECTRO-STEEL ALLOYED WITH CHROMIUM

A.A. Umanskii¹, A.V. Golovatenko², A.S. Simachev¹

¹ Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

² JSC “EVRAZ - Joint West Siberian Metallurgical Plant”, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

Abstract. Type, relative concentration and size of most characteristic non-metallic inclusions for the elements of rails (head, web) from electro-steel of E79KhF and E90KhAF grades were determined on the basis of metallographic (with a microscope “OLYMPUS GX-51”) and spectral (using spectrometer “ARL iSpark”) method “Spark-DAT”) analyses. It was found that the highest relative concentration of manganese sulfides (MnS) is 30.8 – 43.4 ppm. At the same time, 60 – 100 % of inclusions of this type are of small sizes (less than 4 μm), and it does not allow them to be detected using standard metallographic analysis with 100-fold magnification. The revealed high relative concentration of sulfide inclusions directly correlates with the established positive sulfur liquation in considered rail elements, which is up to 40 %. Despite the high concentration of

manganese sulfides, their influence on the quality of rails can be considered not dangerous, taking into account their high ductility during hot deformation and the established prevalence of inclusions of this type with small size (less than 4 μm). Among inclusions of a silicate type, SiO₂ inclusions (3.4 – 14.9 ppm) have a significant concentration. All detected inclusions of this type have a size not exceeding 4 μm. It was found that the concentration of complex inclusions containing alumina (Al₂O₃–CaO–MgO, Al₂O₃–CaO–MgO–CaS, Al₂O₃–CaO, Al₂O₃–MgO) is insignificant: in total it does not exceed 3.1 ppm and 1.6 ppm for individual types. The concentration of corundum (Al₂O₃) is also insignificant and does not exceed 0.3 ppm. In this case, alumina inclusions of small size (less than 6 μm) prevail. Due to the low contamination (taking into account the relative concentration and size of inclusions) with non-plastic silicate and alumina non-metallic inclusions, their influence on the quality of the rails was not significant. It is confirmed by the absence of defects detected during ultrasonic testing.

Keywords: railway rails, rail steel, chromium alloying, nonmetallic inclusions, sulfides, silicates, plasticity, hot deformation, liquation.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-12-936-942

REFERENCES

1. Zhang H., Liu C., Lin Q., Wang B., Liu X., Fang Q. Formation of plastic inclusions in U71Mn high-speed heavy-rail steel refined by CaO–SiO₂–Al₂O₃–MgO slag. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. 2019, vol. 50, no. 1, pp. 459–470.
 2. Kalisz D., Gerasin S., Bobrowski P., Zak P.L., Skowronek T. Computer simulation of microsegregation of sulphur and manganese and formation of MnS inclusions while casting rail steel. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2016, vol. 61, no. 4, pp. 1939–1944.
 3. Zhao K.-w., Zeng J.-h., Wang X.-h. Nonmetallic inclusion control of 350 km/h high speed rail steel. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2009, vol. 16, no. 3, pp. 20–26.
 4. Garber A.K., Arsenkin A.M., Grigorovich K.V., Shibaev S.S., Kushnarev A.V., Petrenko Yu.P. Analysis of various versions of the deoxidation of rail steel at OAO NTMK. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2009, vol. 2009, no. 7, pp. 581–586.
 5. Grigorovich K.V., Shibaev S.V. Influence of smelting technology on steel purity by non-metallic inclusions. In: *Nemetallicheskie vklyucheniya v rel'zovoi stali: sb. nauch. tr.* [Non-metallic inclusions in rail steel: Coll. of sci. works]. Ekaterinburg: izd. UIM, 2005, pp. 74–86. (In Russ.).
 6. Dobuzhskaya A.B., Smirnov L.A., Mukhranov N.V., Fomichev M.S., Belokurova E.V. Composition of non-metallic inclusions in rails. *Stal'*. 2015, no. 5, pp. 82–86. (In Russ.).
 7. Yur'ev A.B., Godik L.A., Devyatkin Yu.D., Kozyrev N.A., Tokarev A.V. Reduction of rail steel by calcium carbonate. *Steel in Translation*. 2008, vol. 38, no. 4, pp. 312–314.
 8. Dhua S.K., Ray A., Sen S.K., Prasad M.S., Mishra K.B., Jha S. Influence of nonmetallic inclusion characteristics on the mechanical properties of rail steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2000, vol. 9, no. 6, pp. 700–709.
 9. Grigorovich K.V., Arsenkin A.M., Trushnikova A.S. Non-metallic inclusions: assessment and prediction of the operational stability of rails. In: *Nemetallicheskie vklyucheniya v rel'zovoi stali: sb. nauch. tr.* [Non-metallic inclusions in rail steel: Coll. of sci. works]. Ekaterinburg: izd. UIM, 2005, pp. 102–115. (In Russ.).
 10. Dobuzhskaya A.B., Deryabin A.A., Semenov V.E., Reikhart V.A. The study of the Composition and sources of non-metallic inclusions that cause the formation of contact-fatigue defects in the rails produced by Nizhny Tagil Metallurgical Plant. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2006, no. 10, pp. 33–36. (In Russ.).
 11. Kozyrev N.A. Main development trends for low temperature operate reliability rails production. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, vol. 54, no. 4, pp. 31–34. (In Russ.).
 12. Yur'ev A.B., Godik L.A., Nugumanov R.F., Kozyrev N.A., Korneva L.V. Production and quality of rails made of E90AF steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2009, vol. 52, no. 8, pp. 34–37. (In Russ.).
 13. Godik L.A., Kozyrev N.A., Korneva L.V. Optimizing the oxygen content in rail steel. *Steel in Translation*. 2009, vol. 39, no. 3, pp. 240–242.
 14. Yur'ev A.B., Godik L.A., Kozyrev N.A., Korneva L.V., Shcheglova A.B. 90AF steel rail. *Steel in Translation*. 2008, vol. 38, no. 7, pp. 589–591.
 15. Umanskii A.A., Golovatenko A.V., Temlyantsev M.V., Dorofeev V.V. Experimental studies of ductility and deformation resistance of chromium rail steels. *Chernye metally*. 2019, no. 6, pp. 24–28. (In Russ.).
 16. Umanskii A.A., Golovatenko A.V., Simachev A.S., Oskolkova T.N., Dorofeev V.V. Plasticity and deformation resistance of the alloyed rail steels in rolling temperature interval. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 60, no. 6, pp. 452–460. (In Russ.).
 17. 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, vol. 411, no. 012078.
 18. Kozyrev N.A., Protopopov E.V., Umanskii A.A., Boikov D.V. Improved deoxidation technologies and secondary treatment of rail electric steel in order to improve the quality of railway rolling. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, vol. 58, no. 10, pp. 721–727. (In Russ.).
 19. Kuss H., Lungen S., Müller G. Comparison of spark OES methods for analysis of inclusions. *Anal. Bioanal. Chem*. 2002, vol. 374, no. 11, pp. 1242–1249.
 20. Kuss H.M., Mittelstaedt H., Mueller G. Inclusion mapping and estimation of inclusion contents in ferrous materials by fast scanning laser-induced optical emission spectrometry. *Anal. At. Spectrom.* 2005, vol. 20, no. 5, pp. 730–735.
 21. Bokk D.N., Labusov V.A., Zarubin I.A. Determination of nonmetallic inclusions in metal alloys by atomic emission spectrometry with spark excitation. *Zavodskaya laboratoriya*. 2015, vol. 81, no. 1, pp. 92–97. (In Russ.).
- Acknowledgements.** The work was performed in SibGIU using the equipment of the Center for Collective Use “Materials Science” in frame of the State task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 11.6365.2017/8.9.
- Information about the authors:**
- A.A. Umanskii*, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Ferrous Metallurgy (umanskii@bk.ru)
A.V. Golovatenko, Cand. Sci. (Eng.), Director of Rail Production (Aleksey.Golovatenko@evraz.com)
A.S. Simachev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metal Forming and Metal Science. JSC “EVRAZ ZSMK” (simachev_as@mail.ru)

Received September 5, 2018

Revised September 27, 2019

Accepted October 18, 2019