



Оригинальная статья

УДК 669.18:620.192

DOI 10.17073/0368-0797-2021-5-345-352



ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ ЧИСТОТЫ ПО НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ВКЛЮЧЕНИЯМ

А. М. Григорьев¹, М. С. Кузнецов², Д. С. Шепелев²,
Е. М. Алексеев², К. В. Григорович^{1,3}

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

² АО «Уральская Сталь» (Россия, 462353, Оренбургская обл., Новотроицк, ул. Заводская, 1)

³ Институт металлургии и материаловедения им А.А. Байкова РАН (Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., 49)

Аннотация. Целью данного исследования являлось изучение причин образования недеформируемых неметаллических включений в рельсовой стали и пути снижения отбраковки готовых рельсов по дефектам ультразвукового контроля. Исследования проводили в условиях электросталеплавильного цеха АО «Уральская Сталь». В центральной заводской лаборатории комбината был проведен химический анализ неметаллических включений в образцах готовых рельсов, отбракованных на установке ультразвукового контроля при производстве рельсов ТОО «Актюбинский рельсобалочный завод» из заготовки производства АО «Уральская Сталь». По своему составу неметаллические включения представлены оксидами алюминия. Определены наиболее вероятные причины получения неметаллических включений: в результате использования ферросплавов, содержащих в своем составе алюминий, или взаимодействия компонентов расплава с огнеупорными материалами и шлакообразующей смеси. Проведен анализ ферросплавов, применяемых при производстве рельсовой стали. Произведено промышленное опробование технологии производства непрерывнолитой заготовки рельсовой стали с заменой ферросилиция марки ФС65, имеющего в своем составе алюминий, на карбид кремния. Отмечено повышение степени усвоения кремния и углерода на опытных плавках. Оценка загрязненности неметаллическими включениями и оценка механических свойств рельсовой стали, полученной по опытной технологии, показали, что служебные характеристики металла рельсовой стали соответствуют требованиям ГОСТ Р 51685-2013. Промышленным экспериментом подтверждено, что технология легирования карбидом кремния рельсовой стали Э76Ф в условиях АО «Уральская Сталь» технически возможна. На опытной партии металла получено увеличение выхода годных 100-метровых рельсов на 17 %, произведенных из непрерывнолитой заготовки АО «Уральская Сталь».

Ключевые слова: производство стали, рельсовая сталь, ферросплавы, раскисление, неметаллические включения

Для цитирования: Григорьев А.М., Кузнецов М.С., Шепелев Д.С., Алексеев Е.М., Григорович К.В. Оптимизация технологии производства непрерывнолитой заготовки рельсовой стали с целью повышения чистоты по неметаллическим включениям // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 5. С. 345–352. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-345-352>

Original article

OPTIMIZATION OF PRODUCTION TECHNOLOGY OF CONTINUOUS CAST RAIL STEEL FOR INCREASING ITS PURITY BY NON-METALLIC INCLUSIONS

A. M. Grigor'ev¹, M. S. Kuznetsov², D. S. Shepelev²,
E. M. Alekseev², K. V. Grigorovich^{1,3}

¹ National University of Science and Technology "MISIS" (MISIS) (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

² JSC "Ural Steel" (1 Zavodskaya Str., Novotroitsk, Orenburg Region 462356, Russian Federation)

³ Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences (49 Leninskii Ave., Moscow 119991, Russian Federation)

Abstract. The purpose of the work was to examine the reasons for formation of non-deformable non-metallic inclusions in rail steel and ways to reduce the rejection of finished rails due to the defects revealed during ultrasonic testing. The study was conducted at the steelmaking plant of JSC "Ural Steel". In the central laboratory of the combine, a chemical analysis of non-metallic inclusions was carried out in the samples of finished rails produced from blanks manufactured by JSC "Ural Steel" and rejected at the ultrasonic test unit during the rail production at the "Aktobe Rail and Section Works" LLP. Non-metallic inclusions by their composition are represented by aluminium oxides. The most probable reasons for their formation have been determined as following: the use of aluminium containing ferroalloys and interaction of the melt components with refractory materials and casting

powder. The authors made analysis of the ferroalloys used in production of rail steel. Industrial trials of the manufacturing process of continuously cast blanks from rail steel were carried out, where FS65 ferrosilicon, which contains aluminium, was replaced with silicon carbide. An increasing degree of silicon and carbon recovery in trial heats was noted. Evaluation of contamination with non-metallic inclusions and mechanical properties of the rail steel manufactured using the experimental technology showed that the service characteristics of the rail steel meet requirements of the state standard GOST R 51685 – 2013. The full-scale experiment has confirmed that the technology of alloying E76F rail steel with silicon carbide at JSC “Ural Steel” is technically feasible. The yield of 100-meter rails was increased by 17 % on a trial batch produced from JSC “Ural Steel” continuously cast blanks.

Keywords: steel production, rail steel, ferroalloys, deoxidation, non-metallic inclusions

For citation: Grigor'ev A.M., Kuznetsov M.S., Shepelev D.S., Alekseev E.M., Grigorovich K.V. Optimization of production technology of continuous cast rail steel for increasing its purity by non-metallic inclusions. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 5, pp. 345–352. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-345-352>

ВВЕДЕНИЕ

Железнодорожный транспорт России – одна из важнейших базовых отраслей экономики. Данный вид транспорта является универсальным, так как способен перевозить практически все виды грузов.

С каждым годом сложность и динамичность железнодорожной транспортной системы возрастают за счет увеличения транспортных потоков. Ведущее значение железнодорожного транспорта обусловлено двумя факторами: технико-экономическими преимуществами над многими другими видами транспорта и совпадением направления основных транспортно-экономических связей России [1 – 3].

С развитием высокоскоростных железных дорог предъявляются гораздо более высокие требования к комплексным свойствам железнодорожных рельсов. Поскольку аварии на железнодорожных дорогах угрожают безопасности перевозок, следовательно, все большее внимание уделяется качеству рельсовой стали.

Приоритетным направлением развития металлургической отрасли является получение стабильных служебных характеристик металлопродукции при сокращении материальных и энергетических затрат на производство.

Известно, что для потребителя одной из важнейших характеристик является эксплуатационная стойкость рельсов. Анализ железнодорожных рельсов разных компаний-производителей, проведенный в работах [4 – 11], показал различную эксплуатационную стойкость при испытаниях на экспериментальном кольце АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта». Установлено, что небольшие изменения макро- и микроструктуры и химического состава стали незначительно влияют на эксплуатационную стойкость рельсов. Основное влияние на эксплуа-

тационную стойкость оказывает чистота стали по неметаллическим включениям [12 – 15].

Целью данного исследования являлось изучение причин образования неметаллических включений в рельсовой стали и пути снижения отбраковки готовых рельсов по дефектам ультразвукового контроля (УЗК).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В 2017 г. после модернизации блюмовой четырехручьевого машины непрерывного литья заготовки (МНЛЗ) № 1 в электросталеплавильном цехе (ЭСЦ) АО «Уральская Сталь» началось освоение технологии производства непрерывнолитой заготовки для производства железнодорожных рельсов.

Выплавку полупродукта производят в электродуговой сталеплавильной печи (ДСП), оснащенной трансформатором мощностью 95 МВА. В качестве шихты используют жидкий чугун и металлолом. Химический состав рельсовой стали Э76Ф представлен в табл. 1.

На установке ковш-печь (УКП) и установке вакуумирования стали (УВС) камерного типа производят внепечную обработку стали. Непрерывную разливку осуществляют на МНЛЗ № 1 с получением блюмовой заготовки сечением 300×330 мм для дальнейшего производства железнодорожных рельсов на ТОО «Актюбинский рельсобалочный завод» (АРБЗ).

Выход годных 100-метровых рельсов на этапе освоения производства из непрерывнолитой заготовки АО «Уральская Сталь» ежемесячно составлял от 33 до 80 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В центральной лаборатории АО «Уральская Сталь» проведен химический анализ неметаллических вклю-

Таблица 1

Химический состав рельсовой стали Э76Ф

Table 1. Chemical composition of E76F rail steel

Массовая доля элементов, %							
C	Mn	Si	V	Cr	P	S	Al
0,71 – 0,82	0,75 – 1,25	0,25 – 0,60	0,03 – 0,15	<0,200	<0,020	<0,020	<0,004

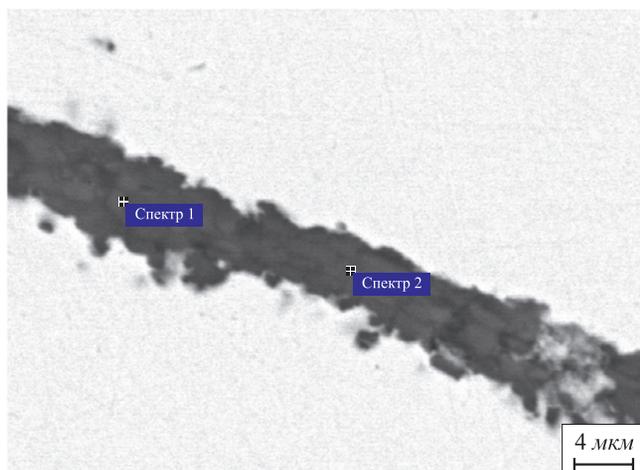
чений в образцах готовых рельсов, отбракованных по дефектам УЗК при производстве рельсов из заготовки АО «Уральская Сталь» на ТОО «АРБЗ».

Анализ проводился с помощью растрового электронного микроскопа JSM-6490LV с системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 250. Данный метод исследования является относительным и применяется только для определения концентрации основных элементов материала. Предел обнаружения элементов в зависимости от атомного номера составляет 0,1 – 0,5 % (рис. 1).

В результате проведенного металлографического анализа было показано, что дефекты в образце, вырезанном из рельса, представляют собой расслоения по неметаллическим включениям, максимальная протяженность которых составляет 4,0 мм. По своему составу неметаллические включения представлены оксидами алюминия, но также присутствуют оксиды кальция, кремния и магния. Наиболее вероятными причинами получения неметаллических включений является использование ферросплавов, содержащих в своем составе алюминий, или результат взаимодействия компонентов расплава с огнеупорными материалами.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Технология производства рельсовой непрерывнолитой заготовки в ЭСПЦ АО «Уральская Сталь» предполагает использование для легирования стали ферросилиция марки FeSi65, ферромарганца марки FeMn78 и ферросиликомарганца марки FeMnSi17 (табл. 2).



Спектр	Содержание химических элементов, %					
	O	Mg	Al	Si	Ca	Fe
1	44,09	0,48	48,68	1,70	1,99	2,14
2	42,42	0,60	44,85	2,67	5,72	3,16

Рис. 1. Неметаллические включения в рельсе

Fig. 1. Nonmetallic inclusions in a rail

Таблица 2

Химический состав ферросплавов

Table 2. Chemical composition of the ferroalloys

Ферросплав	Массовая доля элементов в ферросплаве, %					
	Si	Mn	C	Al	S	P
FeSi65	63 – 68	–	≤0,1	≤1,3	≤0,2	≤0,05
FeMn78	≤6	75 – 82	≤7,0	–	≤0,2	≤0,05
FeMnSi17	15 – 20	≥65	≤3,5	–	≤0,2	≤0,06

Из данных табл. 2 следует, что в ферросилиции марки FeSi65 содержится примерно до 1,3 % Al. Средний расход на плавку составляет 10,5 кг/т.

В работе [16] рассмотрен результат применения при производстве стали ферросилиция различных марок с содержанием алюминия 1,34, 1,4 и 0,04 %. Отмечено, что применение ферросилиция с высоким содержанием алюминия, в отличие особо чистого ферросилиция, ведет к увеличению количества образовавшихся включений Al₂O₃.

Согласно средним фактическим данным содержания алюминия в ферросилиции, применяемом для производства рельсовой стали, произведем расчет возможного прироста алюминия в металле.

Уравнение расхода ферросплавов:

$$G_{\text{фс}} = \frac{G_{\text{Me}} ([E]_{\text{кк}} - [E]_{\text{нк}})}{[E]_{\text{фс}} U_{\text{усв}}} 100, \quad (1)$$

где $G_{\text{фс}}$ – масса вводимого ферросплава, кг; G_{Me} – масса металла, кг; $[E]_{\text{кк}}$ – содержание элемента в металле после ввода ферросплава, %; $[E]_{\text{нк}}$ – содержание элемента в металле до ввода ферросплава, %; $[E]_{\text{фс}}$ – содержание элемента в ферросплаве, %; $U_{\text{усв}}$ – коэффициент усвоения элемента.

Для расчета принимаем коэффициент усвоения алюминия в рассматриваемых ферросплавах 90 % и содержание элемента в металле до ввода ферросплава 0 %. В табл. 3 представлена расчетная информация.

Из расчета следует, что в фактических условиях прирост алюминия в металле от применения ферроси-

Таблица 3

Расчет прироста алюминия из ферросилиция

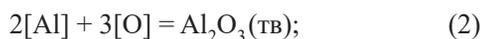
Table 3. Calculation of the gain of aluminum from ferrosilicon

Ферросплав	Содержание алюминия в ферросплаве, %	Средний расход ферросилиция на плавку, кг/т	Коэффициент усвоения алюминия, %	Расчет прироста [Al], %
FeSi65	1,3	10,5	90	0,0123

лия марки FeSi65, в котором содержится примерно 1,3 % Al, составляет 0,0123 % (по массе), что существенно превышает требования ГОСТ Р 51685-2013.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ

Произведен термодинамический расчет образования неметаллических включений на основе оксидов алюминия (Al₂O₃) в рельсовой стали при температуре 1873 К. Рассматриваемая система: [O], T и [Al]. Независимыми переменными являются температура T и содержание алюминия в металлическом расплаве [Al]:

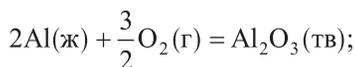


$$K_{Al_2O_3} = \frac{a_{Al_2O_3}}{a_{Al}^2 a_O^3} = \frac{1}{[Al]^2 f_{Al}^2 [O]^3 f_O^3}. \quad (3)$$

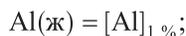
Прологарифмировав уравнение и учитывая, что $\lg K_{Al_2O_3} = \frac{-\Delta G_{Al_2O_3}^\circ}{2,3RT}$, получим:

$$\frac{\Delta G_{Al_2O_3}^\circ}{2,3RT} = 2 \lg [Al] + 2 \lg f_{Al} + 3 \lg [O] + 3 \lg f_O. \quad (4)$$

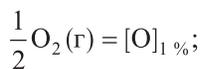
Значение $\Delta G_{Al_2O_3}^\circ$ можно получить алгебраическим сложением следующих уравнений:



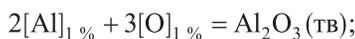
$$\Delta G_{Al_2O_3}^\circ = -1\,687\,908 + 325,15T, \text{ Дж/моль}; \quad (5)$$



$$\Delta G_{[Al]_{1\%}}^\circ = -71\,100 - 19,4T, \text{ Дж/моль}; \quad (6)$$



$$\Delta G_{[O]_{1\%}}^\circ = -117\,110 - 3,39T, \text{ Дж/моль}; \quad (7)$$



$$\Delta G^\circ = \Delta G_{Al_2O_3}^\circ - 2\Delta G_{[Al]_{1\%}}^\circ - 3\Delta G_{[O]_{1\%}}^\circ.$$

Используя температурные зависимости и данные работ [17–21], рассчитывали значения коэффициентов активности $\lg f_i = \sum_j [j]e_i^j$.

Общее уравнение, связывающее рассматриваемые переменные и термодинамические условия образования оксида алюминия в расплаве, представлено ниже:

$$\frac{-1\,194\,378 + 374,12T}{2,3RT} = 2 \lg [Al] + 2 \sum_{Al} [j]e_{Al}^j + 3 \lg [O] + 3 \sum_O [j]e_O^j. \quad (8)$$

Результаты расчетов показывают, что оксид алюминия в рельсовой стали при температуре 1873 К образуется при концентрации алюминия $[Al]_{\min} = 0,0017\%$ (по массе).

С целью улучшения технологии выплавки, внепечной обработки и разливки рельсовой стали Э76Ф были проведены серии опытных плавов, где легирование металла до требуемого ГОСТ Р 51685-2013 содержания кремния в стали осуществляли с применением карбида кремния (рис. 2).

Производство непрерывнолитой заготовки рельсовой стали Э76Ф по опытной и сравнительной технологии выполняли в соответствии с требованиями действующей нормативной документации.

Раскисление стали опытных плавов производили отдачей коксовой мелочи и карбида кремния (порядка 600 кг) на выпуске металла из ДСП в сталеразливочный ковш. Далее на УКП проводили отдачу карбида кремния (около 550 кг). По опытной технологии произведено девять плавов рельсовой стали Э76Ф с применением карбида кремния. В табл. 4 представлена информация по расходу материалов.

В качестве сравнительного металла проведены плавки стали Э76Ф по стандартной технологии с использованием ферросилиция марки FeSi65. Отдача ферросилиция на сравнительных плавках производилась в сталеразливочный ковш во время выпуска металла из ДСП и на УКП.



Массовая доля элементов в материале, %				
Si	C	Al	S	P
62 – 67	22 – 31	–	–	–

Рис. 2. Карбид кремния

Fig. 2. Silicon carbide

Применение карбида кремния показало следующие результаты [2].

- Выход годных 100-метровых рельсов из непрерывной заготовки АО «Уральская Сталь» увеличился на 17 %.

- Усвоение кремния на массу годного металла:

- на сравнительных плавках 53,5 %;

- на опытных плавках 59,7 %.

- Усвоение углерода на массу годного металла:

- на сравнительных плавках 52,5 %;

- на опытных плавках 73,7 %.

- Результаты по оценке неметаллических включений на опытном металле соответствуют требованиям ГОСТ Р 51685 – 2013 (табл. 5).

Результаты по оценке механических свойств металла рельсовой стали Э76Ф соответствуют требованиям ГОСТ Р 51685 – 2013 (табл. 6).

Оценка загрязненности неметаллическими включе-

ниями и механических свойств стали, полученной по опытной технологии, показала, что служебные характеристики металла рельсовой стали соответствуют требованиям ГОСТ Р 51685 – 2013.

РЕЗУЛЬТАТЫ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ РЕЛЬСОВ, ПРОИЗВЕДЕННЫХ ПО ОПЫТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

В центральной лаборатории АО «Уральская Сталь» проведен химический анализ неметаллических включений в образцах готовых рельсов, отбракованных на установке УЗК при производстве рельсов на ТОО «АРБЗ» из заготовки АО «Уральская Сталь».

Анализ проведен с помощью растрового электронного микроскопа JSM-6490LV в комплекте с системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 250 (рис. 3).

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ

В результате проведенного металлографического анализа следует, что дефекты в образце от рельса представляют собой расслоения по неметаллическим включениям максимальной протяженностью 2,1 мм. По своему составу неметаллические включения являются «сложными» и состоят из оксидов алюминия и кремния, но также включают оксиды кальция, калия, натрия, магния и других элементов. Наличие в неметал-

Таблица 4

Расход ферросплавов при производстве стали Э76Ф

Table 4. Ferroalloy consumption in production of E76F steel

Технология	Число плавков	Расход ферросплавов на годный металл, кг/т	
		ферросилиций	карбид кремния
Сравнительная	6	10,5	–
Опытная	9	–	13,8

Таблица 5

Результаты оценки неметаллических включений рельсовой стали Э76Ф

Table 5. Assessment results of nonmetallic inclusions in E76F rail steel

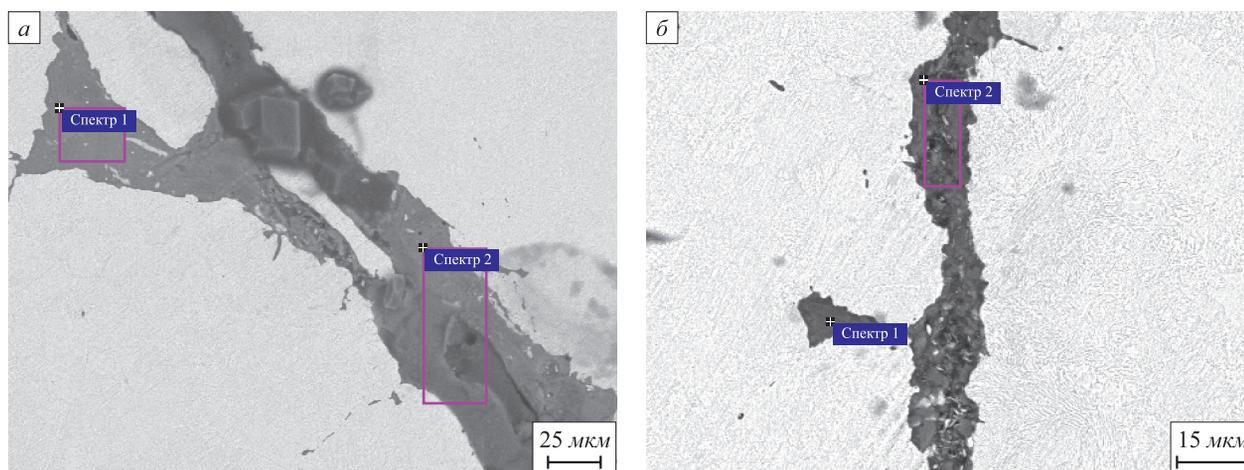
Показатель	Максимальный диаметр отдельных глобулярных включений, мкм	Средний диаметр отдельных глобулярных включений, мкм	Максимальная длина строчечных глобулярных включений, мкм	Средняя длина строчечных глобулярных включений, мкм	Суммарный коэффициент загрязненности мкм ² /мм ²
ГОСТ Р 51685 – 2013	30	20	705	500	30
Опытная технология	11	11	176	104,5	2,24

Таблица 6

Механические свойства рельсовой стали Э76Ф

Table 6. Mechanical properties of E76F rail steel

Показатель	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость, Дж/см ²
ГОСТ Р 51685 – 2013	не менее				
	1180	800	9	25	15
Опытная технология	1310	940	12	25	30



Проба		Содержание химических элементов, %									
		O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Mn	Fe
Рис. 3, а	Спектр 1	38,52	2,38	1,61	23,18	20,87	0,62	1,09	0,77	8,36	1,76
	Спектр 2	44,55	2,30	1,07	15,33	16,85	2,26	2,15	1,49	13,99	–
Рис. 3, б	Спектр 1	38,57	3,57	0,84	17,50	23,68	–	2,50	5,57	5,31	1,70
	Спектр 2	32,93	1,51	0,69	33,49	8,20	0,74	1,01	2,50	3,52	14,78

Рис. 3. Неметаллические включения в рельсе

Fig. 3. Nonmetallic inclusions in a rail

лических включениях калия и натрия, которые присутствуют в шлакообразующей смеси (ШОС) для кристаллизатора, свидетельствует о попадании частиц ШОС в металл во время непрерывной разливки стали.

Выводы

В результате производства рельсовой стали Э76Ф по опытной технологии в условиях АО «Уральская Сталь» установлено следующее.

Определены причины возможного образования недеформируемых неметаллических включений на основе оксидов алюминия, являющиеся причиной брака рельсов по ультразвуковому контролю.

Разработаны рекомендации для корректировки технологии производства рельсовой стали Э76Ф в условиях АО «Уральская Сталь» с заменой ферросилиция марки FeSi65 на карбид кремния.

Экспериментально подтверждено, что технология легирования карбидом кремния рельсовой стали Э76Ф в условиях АО «Уральская Сталь» технически возможна.

Показано, что служебные характеристики непрерывнолитой заготовки рельсовой стали Э76Ф, произведенной по опытной технологии с применением карбида кремния, соответствуют требованиям ГОСТ Р 51685 – 2013.

Получено увеличение выхода годных 100-метровых рельсов, произведенных из непрерывнолитой заготовки АО «Уральская Сталь» на 17 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Грузовой железнодорожный транспорт России в 2010 – 2015 гг.: Аналитический доклад. Институт проблем естественных монополий, май 2016. С. 2–4.
2. Анисимов Н.К., Zubov С.П., Кузнецов М.С., Шепелев Д.С., Григорович К.В., Григорьев А.М. Оптимизация технологии производства непрерывнолитой заготовки транспортного металла для производства железнодорожных рельс с целью повышения технико-экономической эффективности использования новых материалов // Сборник трудов XV Международного конгресса сталеплавателей. Тула, 2018. С. 419–422.
3. Марочник сталей и сплавов / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский и др. / Под общ. ред. А.С. Зубченко. М.: Машиностроение, 2003. 784 с.
4. Григорович К.В., Трушников А.С., Арсенкин А.М., Шибавев С.С., Гарбер А.К. Исследование структуры и металлургичес-

1. *Freight rail transport in Russia in 2010 – 2015: Analytical report.* Institute for Natural Monopoly Problems, May 2016, pp. 2–4. (In Russ.).
2. Anisimov N.K., Zubov S.P., Kuznetsov M.S., Shepelev D.S., Grigorovich K.V., Grigor'ev A.M. Optimization of the production technology of continuously cast blanks from transport metal for the production of railway rails in order to increase technical and economic efficiency of the new materials use. In: *Proceedings of the XV Int. Congr. of Steelmakers.* Tula, 2018, pp. 419–422. (In Russ.).
3. Zubchenko A.S., Koloskov M.M., Kashirskii Yu.V., etc. *Grade Guide of Steels and Alloys.* Zubchenko A.S. ed. Moscow: Mashinostroenie, 2003, 784 p. (In Russ.).
4. Grigorovich K.V., Trushnikova A.S., Arsenkin A.M., Shibaev S.S., Garber A.K. Structure and metallurgical quality of rail steels pro-

- кого качества рельсовых сталей различных производителей // *Металлы*. 2006. № 5. С. 1–16.
5. Шур Е.А., Трусова Т.Н., Григорович К.В., Трушевский С.М. Применение фракционного газового анализа для оценки эксплуатационных свойств рельсов // *Материалы юбилейной рельсовой комиссии*. Новокузнецк, 2002. С. 229–248.
 6. Григорович К.В., Арсенкин А.М., Трушникова А.С. и др. Неметаллические включения: оценка и прогноз эксплуатационной стойкости рельсов // *Неметаллические включения в рельсовой стали: Сборник научных трудов*. Екатеринбург: УИМ, 2005. С. 102–115.
 7. Корнева Л.В., Юнин Г.Н., Козырев Н.А., Атконова О.П., Полевой Е.В. Сравнительный анализ показателей качества рельсов ОАО «Новокузнецкий металлургический комбинат» и зарубежных производителей // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2010. № 12. С. 38–42.
 8. Шур Е.А. Повреждение рельсов. М.: Интекст, 2012. 192 с.
 9. Шейнман Е. Износ рельсов // *Трение и износ*. 2012. Т. 33. № 4. С. 413–422.
 10. Hu Y., Zhou L., Ding H.H., Lewis R., Liu Q.Y., Guo J., Wang W.J. Microstructure evolution of railway pearlitic wheel steels under rolling-sliding contact loading // *Tribology International*. 2021. Vol. 154. Article 106685. <http://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106685>
 11. Liu P., Quan Y., Wan J. Yu L. Experimental investigation on the wear and damage behaviors of machined wheel-rail materials under dry sliding conditions // *Materials*. 2021. Vol. 14. No. 3. Article 540. <http://doi.org/10.3390/ma14030540>
 12. Zhang L., Thomas B.G. State of the art in evaluation and control of steel cleanliness // *ISIJ International*. 2003. Vol. 43. No. 3. P. 271–291. <http://doi.org/10.2355/isijinternational.43.271>
 13. 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. [http://doi.org/10.1016/S1006-706X\(09\)60038-8](http://doi.org/10.1016/S1006-706X(09)60038-8)
 14. Fruehan R.J., Nassaralla C.L. Evaluation of new steelmaking technologies // *McLean Symposium Proceedings, Iron & Steel Society, Warrendale*, 1998. P. 205–216.
 15. Zhang L., Thomas B.G. State of the art in the control of inclusions during steel ingot casting // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2006. Vol. 37. No. 5. P. 733–761. <http://doi.org/10.1007/s11663-006-0057-0>
 16. Wijk O., Brabie V. The purity of ferrosilicon and its influence on inclusion cleanliness of steel // *ISIJ International*. 1996. No. 36. P. 132–135. https://doi.org/10.2355/isijinternational.36.suppl_s132
 17. *Steelmaking Data Sourcebook*. N.Y.-Tokyo: Gordon&Breach Science Publ., 1988. 325 p.
 18. Снитко Ю.П., Суевой Ю.Т., Лякишев Н.П. Соотношение между параметрами взаимодействия и атомными характеристиками компонентов // *Доклады АН СССР*. 1983. Т. 268. № 5. С. 1154–1156.
 19. Katsnelson A.M., Dashevskiy V.Ya., Kashin V.I. Carbon activity in Fe-, Co-, Ni- and Mn-based melts at 1873 K // *Steel Research*. 1993. Vol. 64. P. 197–202. <http://doi.org/10.1002/srin.199301008>
 20. Sigworth G.K., Elliott J.F. The thermodynamics of liquid dilute iron alloys // *Metal Science*. 1974. Vol. 8. No. 9. P. 298–308. <https://doi.org/10.1179/msc.1974.8.1.298>
 21. *The Recommended Values for the Reaction in Steelmaking*. 2nd ed., ed. by the 19 Committee (Ironmaking), Japan Soc. Promotion of Sci., Tokyo. 1984. 254 p.
5. Shur E.A., Trusova T.N., Grigorovich K.V., Trushevskii S.M. Application of fractional gas analysis to assess rails performance. In: *Materials of the Jubilee Rail Commission*. Novokuznetsk 2002, pp. 229–248. (In Russ.).
 6. Grigorovich K.V., Arsenkin A.M., Trushnikova A.S., etc. Application of fractional gas analysis to assess the performance properties of rail steel. In: *Improving the Quality and Service Life of Rail Steel. Proceedings*. Yekaterinburg: UIM, 2005, pp. 102–115. (In Russ.).
 7. Korneva L.V., Yunin G.N., Kozyrev N.A., Atkonova O.P., Polevoi E.V., Comparative analysis of rail product quality indexes of JSC “Novokuznetsk Metallurgical Plant” and foreign manufacturers. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 12, pp. 38–42. (In Russ.).
 8. Shur E.A. *Rail Damage*. Moscow: Intekst, 2012, 192 p. (In Russ.).
 9. Sheinman E. Rail wear. *Trenie i iznos*. 2012, vol. 33, no. 4, pp. 413–422. (In Russ.).
 10. Hu Y., Zhou L., Ding H.H., Lewis R., Liu Q.Y., Guo J., Wang W.J. Microstructure evolution of railway pearlitic wheel steels under rolling-sliding contact loading. *Tribology International*. 2021, vol. 154, article 106685. <http://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106685>
 11. Liu P., Quan Y., Wan J. Yu L. Experimental investigation on the wear and damage behaviors of machined wheel-rail materials under dry sliding conditions. *Materials*. 2021, vol. 14, no. 3, article 540. <http://doi.org/10.3390/ma14030540>
 12. Zhang L., Thomas B.G. State of the art in evaluation and control of steel cleanliness. *ISIJ International*. 2003, vol. 43, no. 3, pp. 271–291. <http://doi.org/10.2355/isijinternational.43.271>
 13. 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. [http://doi.org/10.1016/S1006-706X\(09\)60038-8](http://doi.org/10.1016/S1006-706X(09)60038-8)
 14. Fruehan R.J., Nassaralla C.L. Evaluation of new steelmaking technologies. In: *McLean Symposium Proceedings, Iron & Steel Society, Warrendale, 1998*, pp. 205–216.
 15. Zhang L., Thomas B.G. State of the art in the control of inclusions during steel ingot casting. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2006, vol. 37, no. 5, pp. 733–761. <http://doi.org/10.1007/s11663-006-0057-0>
 16. Wijk O., Brabie V. The purity of ferrosilicon and its influence on inclusion cleanliness of steel. *ISIJ International*. 1996, no. 36, pp. 132–135. https://doi.org/10.2355/isijinternational.36.suppl_s132
 17. *Steelmaking Data Sourcebook*. N.Y.-Tokyo: Gordon&Breach Science Publ, 1988, 325 p.
 18. Snitko Yu.P., Surovoi Yu.T., Lyakishev N.P. Relationship between interaction parameters and atomic characteristics of components. *Doklady AN SSSR*. 1983, vol. 268, no. 5, pp. 1154–1156. (In Russ.).
 19. Katsnelson A.M., Dashevskiy V.Ya., Kashin V.I. Carbon activity in Fe-, Co-, Ni- and Mn-based melts at 1873 K. *Steel Research*. 1993, vol. 64, pp. 197–202. <http://doi.org/10.1002/srin.199301008>
 20. Sigworth G.K., Elliott J.F. The thermodynamics of liquid dilute iron alloys. *Metal Science*. 1974, vol. 8, no. 9, pp. 298–308. <https://doi.org/10.1179/msc.1974.8.1.298>
 21. *The Recommended Values for the Reaction in Steelmaking*. 2nd ed., ed. by the 19 Committee (Ironmaking), Japan Soc. Promotion of Sci., Tokyo. 1984, 254 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Антон Михайлович Григорьев, аспирант кафедры металлургии стали, новых производственных технологий и защиты металлов, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ORCID: 0000-0001-9317-6491

E-mail: antonmgrigoryev@gmail.com

Максим Сергеевич Кузнецов, к.т.н., начальник управления технического сопровождения сталеплавильного производства, АО «Уральская Сталь»

E-mail: m.kuznetsov@uralsteel.com

Денис Сергеевич Шепелев, главный специалист по сталеплавильному производству, АО «Уральская Сталь»

Евгений Михайлович Алексеев, главный специалист по испытаниям центральной лаборатории комбината, АО «Уральская Сталь»

Константин Всеволодович Григорович, академик РАН, д.т.н., профессор кафедры металлургии стали, новых производственных технологий и защиты металлов, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», заведующий лабораторией диагностики материалов, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова, РАН

ORCID: 0000-0002-5669-4262

Anton M. Grigor'ev, Postgraduate of the Chair of Metallurgy of Steel, New Production Technologies and Metal Protection, National University of Science and Technology "MISIS"

ORCID: 0000-0001-9317-6491

E-mail: antonmgrigoryev@gmail.com

Maksim S. Kuznetsov, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Steelmaking Production Technical Support, JSC "Ural Steel"

E-mail: m.kuznetsov@uralsteel.com

Denis S. Shepelev, Chief Specialist in Steelmaking, JSC "Ural Steel"

Evgenii M. Alekseev, Chief Specialist on Tests of the Central Laboratory, JSC "Ural Steel"

Konstantin V. Grigorovich, Academician, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Metallurgy of Steel, New Production Technologies and Metal Protection, National University of Science and Technology "MISIS", Head of the Laboratory of Materials Diagnostics, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0002-5669-4262

Поступила в редакцию 15.02.2021

После доработки 17.02.2021

Принята к публикации 16.04.2021

Received 15.02.2021

Revised 17.02.2021

Accepted 16.04.2021